



MATERIAL PARTICULADO EN ESPAÑA: NIVELES, COMPOSICIÓN Y CONTRIBUCIÓN DE FUENTES

X. Querol, A. Alastuey, T. Moreno, M.M. Viana, S. Castillo,
J. Pey, S. Rodríguez, A. Cristóbal, S. Jiménez, M. Pallarés,
J. de la Rosa, B. Artíñano, P. Salvador, M. Sánchez,
S. García Dos Santos, M.D. Herce Garraleta,
R. Fernández-Patier, S. Moreno-Grau, L. Negral,
M.C. Minguillón, E. Monfort, M.J. Sanz, R. Palomo-Marín,
E. Pinilla-Gil, E. Cuevas



MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE

MATERIAL PARTICULADO EN ESPAÑA: NIVELES, COMPOSICIÓN Y CONTRIBUCIÓN DE FUENTES

X. Querol¹, A. Alastuey¹, T. Moreno¹, M.M. Viana¹, S. Castillo¹,
J. Pey¹, S. Rodríguez¹, A. Cristóbal², S. Jiménez², M. Pallarés²,
J. de la Rosa³, B. Artíñano⁴, P. Salvador⁴, M. Sánchez⁴,
S. García Dos Santos⁵, M.D. Herce Garraleta⁵,
R. Fernández-Patier⁵, S. Moreno-Grau⁶, L. Negral⁶,
M.C. Minguillón^{1,7}, E. Monfort⁷, M.J. Sanz⁸, R. Palomo-Marín⁹,
E. Pinilla-Gil⁹, E. Cuevas¹⁰

Esta publicación es el resultado de los trabajos llevados a cabo en el contexto de dos Convenios de colaboración entre el Ministerio de Medio Ambiente y el Instituto Jaume Almera del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) para el estudio y evaluación de la contaminación por material particulado en España.

N.I.P.O.: 310-06-107-8

Depósito Legal: M. 40.716-2006

Imprime: Sociedad Anónima de Fotocomposición
Talisio, 9 - 28027 Madrid

¹ Instituto de Ciencias de la Tierra "Jaume Almera", CSIC, Barcelona

² D.G. Calidad y Evaluación Ambiental, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid

³ Dpto. de Geología, Univ. Huelva, Campus Universitario de la Rábida, La Rábida, Huelva

⁴ CIEMAT, Avda. Complutense 22, Madrid

⁵ Instituto de Salud Carlos III, Madrid

⁶ Departamento Ing. Química y Ambiental. Universidad Pol. Cartagena, Cartagena

⁷ Instituto de Tecnología Cerámica, Campus Universitario Riu Sec, Castellón

⁸ CEAM, Paterna, Valencia

⁹ Departamento de Química Analítica y Electroquímica, Universidad de Extremadura, Badajoz

¹⁰ Observatorio Atmosférico de Izaña, INM, Santa Cruz de Tenerife

Índice

Presentación5

Resumen7

Introducción.....9

Metodología11

Resultados e interpretación.....14

Niveles de Material Particulado (PM).....15

Componentes mayoritarios18

Elementos traza25

Análisis de contribución de fuentes30

Conclusiones34

Niveles de PM₁₀ y PM_{2,5}34

Componentes de PM₁₀ y PM_{2,5}.....34

Contribución de fuentes de PM₁₀ y PM_{2,5}.....37

Agradecimientos39

Bibliografía.....40

PRESENTACIÓN

La contaminación atmosférica por material particulado se define como la alteración de la composición natural de la atmósfera como consecuencia de la entrada en suspensión de partículas, ya sea por causas naturales o por la acción del hombre (causas antropogénicas). Los efectos de la contaminación por material particulado han sido demostrados en diferentes ámbitos, entre los cuales destacan la salud humana, el clima y los ecosistemas. Numerosos estudios epidemiológicos afirman que existe una relación entre la exposición al material particulado atmosférico y diversos efectos adversos sobre la salud, tales como afecciones respiratorias y cardiovasculares. Por otra parte, multitud de estudios tratan de evaluar la influencia de la emisión de material particulado atmosférico sobre el clima a escala global, tanto sobre el balance radiativo como sobre la formación de nubes o la modificación del albedo. Finalmente, los ecosistemas también sufren los efectos directos o indirectos de la exposición a las partículas atmosféricas, ya que su deposición puede suponer la acidificación y eutrofización de suelos y aguas superficiales, lo cual a su vez puede repercutir sobre la composición de las aguas subterráneas.

Con objeto de minimizar el impacto ambiental y en la salud de la contaminación por material particulado es necesario poner en funcionamiento estrategias de control y reducción de sus emisiones. El trabajo que aquí se presenta consiste en una compilación de los resultados obtenidos tras el análisis de las concentraciones y la composición química del material particulado atmosférico en España, como resultado de dos Convenios de colaboración financiados por la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente en 2001 y 2005. Algunos de los resultados han sido también financiados por las Comunidades Autónomas de Andalucía, Cataluña, Madrid y Valencia. El estudio incluye datos de 28 emplazamientos de medida distribuidos en 12 de las 17 Comunidades Autónomas, y presenta así una cobertura de aproximadamente el 70% del territorio español.

El estudio ha permitido determinar las importantes variaciones que se producen en los niveles medios de concentración de partículas de tamaño grueso (PM_{10}) y fino ($PM_{2.5}$) y en su composición química, entre las distintas regiones geográficas. Se ha observado que la variabilidad existente entre las diferentes regiones está relacionada con factores como las fuentes de emisión, la climatología y la geografía. Uno de los principales resultados obtenidos demuestra que, en diferentes entornos industriales y de tráfico considerados “hotspots”, los niveles medios de PM_{10} llegan a superar de forma habitual los valores límite de concentración recomendados por la legislación en el ámbito nacional y europeo.

Al margen de la evaluación de los niveles de partículas, uno de los principales objetivos del estudio es la evaluación de su origen, es decir, de las fuentes emisoras del material particulado. A través de la aplicación de diferentes herramientas que incluyen desde imágenes de satélite hasta modelos estadísticos, es posible identificar las fuentes o procesos que contribuyen a los niveles y la composición química del material particulado. Inicialmente, estas herramientas permiten llevar a cabo la distinción entre el material particulado de origen natural (por ejemplo, procedente de desiertos africanos) y aquel de origen antropogénico (derivado de actividades humanas). Como resultado del estudio se ha encontrado una clara relación entre los aportes de polvo desértico africano y la superación del valor límite a escala diaria para las partículas gruesas, mientras que la contribución de este material a escala anual sólo es relevante en las regiones del Sur de la Península y en los archipiélagos Canario y Balear.



Se debe resaltar también el esfuerzo hecho en el análisis de los contaminantes traza en PM_{10} y $PM_{2.5}$. El estudio cubre zonas de fondo regional, fondo urbano, sub-urbano e industrial y '*hotspots*' de tráfico e industria. La relación entre los niveles de los citados contaminantes traza y los focos emisores próximos a las estaciones de muestreo han permitido definir unos rangos de concentración propios de los diferentes ambientes considerados para elementos legislados y otros que no lo están en la actualidad pero que probablemente lo estarán en un futuro.

De este modo, la separación entre el material particulado de origen natural y antropogénico constituye un objetivo en sí mismo. Por otra parte, el estudio en detalle de las partículas de origen antropogénico por medio de modelos en receptor ha permitido identificar las principales fuentes emisoras de partículas, entre cuatro y seis en la mayor parte de los emplazamientos seleccionados. Las fuentes más comunes presentes en todos los emplazamientos de medida han sido la mineral, la industrial (con diferentes perfiles químicos según el emplazamiento, desde producción eléctrica hasta procesos petroquímicos), el aerosol marino (únicamente en el aerosol grueso) y el tráfico rodado. El objetivo último de la identificación de las fuentes de emisión consiste en poder actuar sobre ellas, y de este modo ejercer un control efectivo de las emisiones de material particulado con origen antropogénico.

Por último, los resultados obtenidos en este estudio representan la posición de los emplazamientos de medida españoles frente a sus homólogos europeos en cuanto a los niveles y la composición química del material particulado atmosférico. Estos resultados han permitido destacar singularidades de los emplazamientos españoles derivadas de factores geográficos y climatológicos, tales como la influencia del material particulado de origen africano o el mayor porcentaje de materia mineral con respecto a entornos europeos, derivado de la menor tasa de precipitación y la mayor aridez del terreno.

RESUMEN

El estudio llevado a cabo en un elevado número de emplazamientos de medida de material particulado (PM) en España ha permitido determinar las importantes variaciones que se producen en los niveles medios de concentración de PM_{10} y $PM_{2,5}$ y en su composición química, entre sus distintas regiones geográficas. En diferentes entornos industriales y de tráfico considerados “hotspots”, los niveles medios de PM_{10} registrados llegan a superar normalmente los valores límite de concentración recomendados. La variabilidad existente entre los distintos emplazamientos de medida en lo que se refiere a niveles de concentración de PM y a la superación de los valores límite de concentración está relacionada con la existencia de distintos patrones, tanto de emisión de las fuentes de material particulado naturales y antropogénicas, como patrones climáticos y de reactividad/estabilidad de algunas especies presentes en la composición del PM.

La distribución espacial de los distintos componentes analizados muestra que los niveles de concentración de sulfato y carbono alcanzan los máximos valores en áreas industriales y en grandes núcleos urbanos en los que las emisiones generadas por el tráfico son más elevadas, mientras que los niveles de nitrato muestran un aumento desde la

costa Atlántica hasta la Mediterránea, sin que parezca existir una relación aparente con las emisiones regionales de NO_x .

Se ha encontrado también una clara relación entre las intrusiones de polvo desértico Africano y el número de superaciones del valor límite diario de PM_{10} . Sin embargo la contribución de estos procesos de transporte de partículas a larga distancia, a los niveles medios anuales de PM registrados en los distintos emplazamientos de medida, sólo ha sido relevante en las regiones del Sur de la Península y en los archipiélagos Canario y Balear. La contribución del aerosol marino es aproximadamente un orden de magnitud más elevada en las Islas Canarias, que en el resto de las regiones estudiadas. Los factores que más han influido en la variabilidad temporal de los niveles de concentración de PM incluyen los procesos de intrusión de polvo desértico Africano, los episodios de contaminación producidos a escala regional en los distintos emplazamientos de medida, y la diferente actividad registrada en días laborables y en fin de semana. Hay que resaltar también que los mayores índices de radiación solar incidente registrados en los meses de verano favorecen la formación de partículas de $(NH_4)_2SO_4$ pero sin embargo reducen la concentración de NO_3^- particulado (por efecto de la inestabilidad



Los niveles de concentración de PM_{10} y $PM_{2,5}$ varían entre 13-21 $\mu gPM_{10}/m^3$ y 8-14 $\mu gPM_{2,5}/m^3$ en los emplazamientos de medida de fondo regional de la red EMEP, entre 19-21 $\mu gPM_{10}/m^3$ y 12-17 $\mu gPM_{2,5}/m^3$ en la mayor parte de los emplazamientos rurales, entre 28-32 $\mu gPM_{10}/m^3$ y 18-25 $\mu gPM_{2,5}/m^3$ en los emplazamientos suburbanos, entre 28-47 $\mu gPM_{10}/m^3$ y 19-29 $\mu gPM_{2,5}/m^3$ en los emplazamientos de fondo urbano e industrial y entre 46-50 $\mu gPM_{10}/m^3$ y 28-35 $\mu gPM_{2,5}/m^3$ en emplazamientos “hotspots” de tráfico intenso.

térmica del nitrato amónico en verano) y de Cl^- (debido a la volatilización del HCl , producto resultante de la interacción del HNO_3 gaseoso con partículas de NaCl de origen marino), incrementándose además la resuspensión de polvo terrestre en entornos semiáridos de la Península. Los niveles medios de concentración de elementos traza presentes en la composición del PM alcanzan sus máximos valores en emplazamientos “hotspots” industriales y de tráfico. En estos emplazamientos el contenido de algunos metales (Ti, Cr, Mn, Cu, Zn, As, Sn, W y Pb) llega a superar ocasionalmente en un orden de magnitud, el registrado en emplazamientos de fondo rural. Los niveles de Cu y Sb registrados en zonas urbanas son relativamente altos al compararlos con los obtenidos en regiones industriales. Esto es debido probablemente a que en áreas urbanas se producen elevadas emisiones de estos metales, así como de Fe y Zn, por efecto del desgaste de los frenos de los vehículos. Los niveles de Cr, Mn, Ni, Zn, Mo, Se, Sn y Pb son mayores en zonas bajo la influencia de industrias dedicadas a la producción de acero. Los niveles de As, Bi y Cu son relativamente más elevados en zonas bajo la influencia de industrias metalúrgicas de cobre. Los niveles de Zn son relativamente elevados en zonas bajo la influencia de la metalurgia del zinc. Los niveles de V y Ni son relativamente altos únicamente en una de las áreas cercana a plantas

petroquímicas, pero probablemente sus emisiones han tenido muy poco efecto sobre dichos niveles y tengan su origen en procesos de combustión de fuel-oil. Los niveles de Zn, As, Se, Zr, Cs, Tl y Pb, han sido relativamente más altos en las áreas de estudio cercanas a plantas de producción cerámica. Los estudios de contribución de fuentes han mostrado una elevada variabilidad entre los diferentes emplazamientos de medida. En la mayor parte de los casos han permitido identificar entre cuatro y seis fuentes u orígenes de PM. Las fuentes más comunes presentes en todos los emplazamientos de medida han sido la mineral o crustal, la industrial (con diferentes perfiles químicos según el emplazamiento), el aerosol marino (únicamente en las muestras de PM_{10}) y el tráfico rodado. En emplazamientos concretos han sido identificadas otras fuentes o factores como los procesos de combustión (que incluye las emisiones de las centrales térmicas y motores de barcos), o un origen externo o regional. En este último caso el factor representa aquellas emisiones que no son producidas por fuentes locales, y se han definido dos situaciones dependiendo de los emplazamientos estudiados: a) emisiones procedente de transporte a larga distancia caracterizadas mayoritariamente por sulfato amónico, y b) emisiones regionales de aerosol secundario inorgánico, OM+EC (materia orgánica y carbono elemental) y diferentes metales traza.

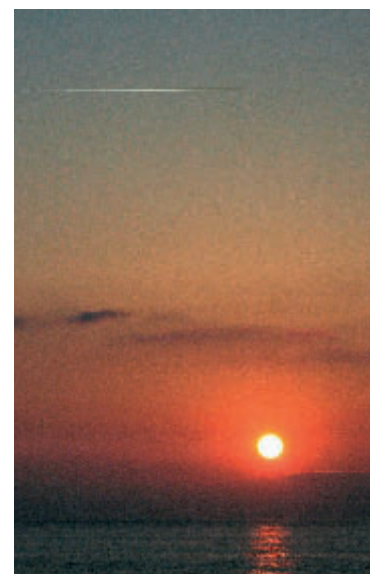
INTRODUCCIÓN

Debido al efecto de los importantes contrastes regionales, tanto climáticos como orográficos, existentes en España entre las regiones montañosas del interior de la Península, las costeras de las vertientes Mediterránea y Atlántica y los archipiélagos (Canario y Balear), se han detectado variaciones significativas en la composición y la evolución estacional de los contaminantes particulados atmosféricos registrados en las zonas urbanas de estas regiones. Los factores que producen variaciones en los niveles de PM en España cobran especial relevancia, puesto que la Directiva Europea 1999/30/CE es mucho más restrictiva que la anteriormente existente. Ello crea la necesidad de ejercer un control más efectivo de las emisiones con origen en las fuentes antrópicas. Hay que tener en cuenta que los niveles existentes de PM_{10} en España están constituidos en una proporción bastante elevada por partículas naturales y antropogénicas resuspendidas (Querol *et al.*, 2004a). Por ello la drástica reducción de los niveles límite promedio de $150 \mu gPST/m^3$ (partículas en suspensión totales) y $300 \mu gPST/m^3$, anual y diario respectivamente vigentes en 2001, a $40 \mu gPM_{10}/m^3$ (anual) y $50 \mu gPM_{10}/m^3$ (diario, percentil 90,4) en vigor en 2005 representa un importante reto a la hora de que estos requerimientos puedan cumplirse en los entornos “hotspots” urbanos e industriales del país.

Durante la última década, distintos estudios epidemiológicos han puesto especial hincapié en los efectos negativos que, sobre la salud humana, parecen ejercer niveles relativamente elevados en la atmósfera de partículas de granulometría fina ($<2,5 \mu m$) principalmente (e.g. Dockery *et al.*, 1993; Abbey *et al.*, 1999; Hoek *et al.*, 2002; Pope *et al.*, 2002). Esta asociación entre niveles de $PM_{2,5}$ y efectos adversos sobre la salud ha promovido el que la Comisión Europea (Second Position Paper on Particulate Matter; CE, 2004 y borrador de la directiva de calidad del aire y aire limpio para Europa de septiembre de

2005) considere la adopción de nuevos valores límite de concentración basados en medidas de $PM_{2,5}$. Se ha propuesto un valor objetivo anual de $25 \mu gPM_{2,5}/m^3$, el cual se convertirá en valor límite en 2015, que no puede ser superado en ningún emplazamiento de medida de la UE, incluyendo “hotspots” a partir del 1 de Julio de 2010. Además se contempla una reducción a la exposición del 20% de los valores medios de $PM_{2,5}$ registrados en emplazamientos de fondo urbano desde 2010 hasta 2020.

La elección de los emplazamientos de las estaciones de medida en los diferentes estados miembros de la UE, se basa en las distintas estrategias diseñadas por los órganos competentes de cada país. En consecuencia el número de estaciones de medida situadas en emplazamientos de carácter rural, urbano, de tráfico e industriales en cada país varía enormemente. De acuerdo con la base de datos Airbase (<http://air-climate.eionet.eu.int/>), entre los años 2001 y 2004 el número de estaciones en España situadas en hotspots ha constituido el 70-80% de las totales, mientras que en el resto de los estados miembros el número de este tipo de estaciones constituye en promedio el 40-45%. En algunos países este dato puede ser incluso inferior al 16%. Obviamente, los niveles medios anuales de PM_{10} y el número de superaciones del valor límite diario registrado en las estaciones de medida de España, situadas en su mayor parte en emplazamientos hotspots urbanos e industriales, serán más elevados que en aquellos países que tengan un porcentaje más alto de estaciones de medida situadas en emplazamientos de fondo rural y urbano. El hecho de que España tenga un porcentaje mayor de estaciones de medida situadas en emplazamientos hotspots con respecto a otros países tiene su explicación en que las estrategias de control de calidad del aire en nuestro país inicialmente estaban enfocadas hacia el control de los niveles de exposición máxima en entornos urbanos. Es decir en



emplazamientos en los que los niveles medios de concentración de PM eran muy elevados, como son los situados en las cercanías de vías de tráfico intenso o de emisiones de origen industrial. Sin embargo la nueva Directiva propone evaluar los niveles de PM a los que se expone regularmente una población representativa de 250.000 habitantes. Por otro lado, hay que señalar el hecho de que en comparación con el valor límite de concentración de $PM_{2,5}$ considerado en los EEUU, el valor objetivo/límite propuesto en la UE es relativamente permisivo, aunque a diferencia del primero también ha de aplicarse en los emplazamientos de medida *hotspots*. Una vez expuestos los retos a los que se enfrenta actualmente la legislación

Europea sobre calidad del aire y los cambios que parece va a sufrir (Putaud *et al.*, 2004), se presenta en este trabajo un resumen de los resultados obtenidos a partir del análisis de datos de contaminación atmosférica por material particulado, recopilados a lo largo de un periodo de 6 años (1999-2005) en un elevado número de emplazamientos de medida de distintas características. De esta manera se ha incrementado notablemente la base de datos analizada en estudios previos (Querol *et al.*, 2004 a y b), lo que ha permitido caracterizar con mayor exactitud los principales factores que controlan los flujos de material particulado en las distintas regiones del país.

METODOLOGÍA

A lo largo del periodo 1999-2005 se han seleccionado distintos emplazamientos de medida, de manera que estuvieran distribuidos a lo largo de la España continental y de las Islas Canarias y Baleares, y que fueran representativos de los principales tipos de condiciones climáticas que se dan en nuestro país y de las distintas actividades antropogénicas que pueden afectar a un entorno de medida. Las áreas de estudio consideradas en la Península Ibérica incluyen Galicia en el noroeste, el País Vasco en el norte, la región más oriental a lo largo de la costa Mediterránea, la meseta central (tanto la meseta Norte como la Sur en el interior de la Península), Andalucía como la región más al sur de la Península representando la interfase Atlántica-Mediterránea y Extremadura en el área centro-oeste junto a Portugal. Tanto las Islas Canarias como las Islas Baleares fueron también seleccionadas como emplazamientos de medida de interés. Las primeras por su proximidad al desierto del Sahara como rasgo diferencial respecto del resto de emplazamientos y las segundas por representar los niveles de PM existentes en entornos insulares del Mediterráneo

occidental. En concreto, en este estudio se muestran los resultados del análisis de los datos obtenidos en los 10 emplazamientos de medida presentados inicialmente por Querol *et al.* (2004a), a los que se han añadido los registrados en 18 nuevos emplazamientos. Los 28 emplazamientos de medida se distribuyeron del siguiente modo (Figura 1 y Tabla 1):

1. Tres estaciones de tráfico: Barcelona-Sagrera, L'Hospitalet y Madrid-E. Aguirre.
2. Dieciséis estaciones de fondo urbano con diferente grado de influencia industrial: Alcobendas, Badajoz, Barcelona (CSIC), Basterreche-Cartagena, L'Alcora, Vila-real, Borriana (las últimas tres ciudades situadas en Castellón), La Línea, Algeciras, Los Barrios (las últimas tres ciudades situadas en Cádiz), Huelva-Hospital M. Lois, Llodio, Puertollano, Las Palmas (Gran Canaria), Santa Cruz de Tenerife, Valencia-El Saler y Tarragona. Todas estas estaciones de medida recibían contribuciones relativamente elevadas de PM con origen en distintas actividades

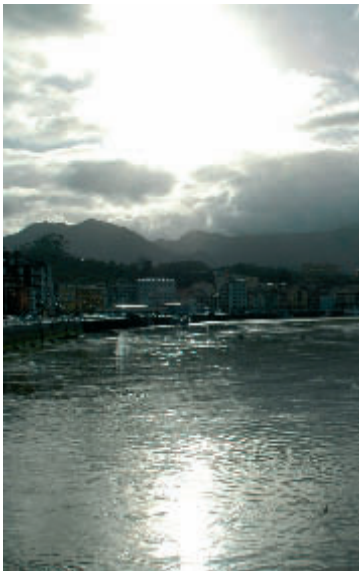
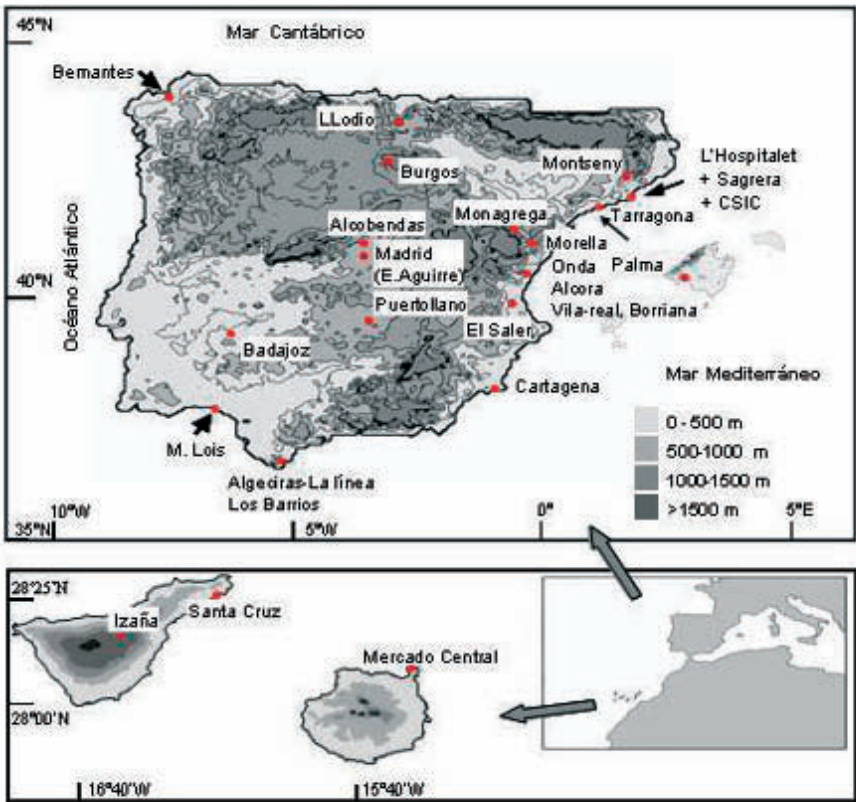


Figura 1. Ubicación de las estaciones de medida seleccionadas en España y de las que se presentan resultados en este trabajo.



- industriales, con excepción de los tres primeros emplazamientos de medida en los que la actividad industrial en el entorno de las estaciones es relativamente bajo.
3. Cinco emplazamientos suburbanos con diferente grado de influencia industrial: Valencia-El Saler, Burgos, Palma de Mallorca, Onda (Castellón) y Cartagena-Santa Ana. Las dos últimas estaciones están situadas en zonas altamente industrializadas.
 4. Cuatro estaciones de fondo regional: la estación de Monagrega-Calanda situada en un entorno semiárido al sur de la cuenca del Ebro, la estación de Bemantes (A Coruña) representativa de un entorno rural fuertemente ventilado por los flujos de viento de origen Atlántico, Morella (Castellón) y Montseny, un emplazamiento de medida situado en un bosque de coníferas en una cordillera

Los datos fueron obtenidos por el método gravimétrico usando captadores de alto volumen para PM_{10} (en la mayoría de los emplazamientos se utilizó el equipo de referencia para la medida de PM_{10} en la UE según la Norma EN12341) y muestreadores de alto o bajo volumen equipados con cabezales de corte para $PM_{2.5}$ y filtros de micro-fibra de cuarzo. Con posterioridad al muestreo, los filtros de PM_{10} y $PM_{2.5}$ fueron analizados químicamente para la determinación del contenido de los principales compuestos y elementos mayoritarios y trazas. En total se han obtenido 57 determinaciones por muestra (los detalles específicos de los procedimientos analíticos se pueden consultar en Querol *et al.*, 2004a). En este trabajo se decidió agrupar los componentes químicos de la siguiente manera: a) componentes crustales o minerales (suma de Al_2O_3 , SiO_2 , CO_3^{2-} , Ca, Fe, K, Mg, Mn, Ti y P); b) componente marino (suma de Cl, Na^+ y sulfato marino); c) OM+EC o materia orgánica y carbono elemental (valor obtenido aplicando un factor de 1.2 a la concentración de carbono orgánico y elemental o valor de OC+EC registrado en emplazamientos urbanos y un factor de 1.4 en los emplazamientos de fondo regional); y d) especies o compuestos inorgánicos secundarios (CIS o SIC, en inglés, como la suma de las concentraciones de SO_4^{2-} no marino, NO_3^- y NH_4^+).

También se realizó un análisis factorial con rotación varimax, para identificar las principales fuentes u orígenes de partículas que afectan a la composición del material particulado en cada emplazamiento de medida (Thurston y Spengler, 1985). Las técnicas de los modelos

de receptor se basan en la evaluación de datos de inmisión registrados en emplazamientos de medida o receptores. Una de las ventajas de la aplicación de estas técnicas es que la mayoría de ellas no precisan de información previa acerca de las fuentes de emisión existentes (Henry *et al.*, 1984). La aplicación de los modelos multivariantes de receptor consta de dos etapas: la identificación de las fuentes y el cálculo de sus contribuciones a la concentración obtenida del material particulado y de sus componentes. Durante el proceso de identificación de las fuentes, se obtienen distintos grupos de las especies químicas analizadas de PM a partir del grado de correlación existente entre las mismas. Cada grupo así obtenido se identifica con una o varias fuentes de partículas. En este proceso los componentes químicos de origen conocido se utilizan como trazadores de las fuentes. Para obtener las fuentes de emisión o factores, se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) de manera que el grupo de factores obtenido para cada grupo de datos analizado explique al menos el 75% de la varianza del mismo. La determinación cuantitativa de las contribuciones de las fuentes resultantes se obtiene a partir del análisis de regresión multilineal (MLRA), utilizando como variable dependiente la concentración de PM y como variables independientes la matriz de componentes factoriales absolutas. Este procedimiento permite obtener estimaciones de las contribuciones de las distintas fuentes a los niveles medios diarios y anuales de concentración de PM, así como estimaciones de la contribución de cada fuente a cada componente específico del material particulado.

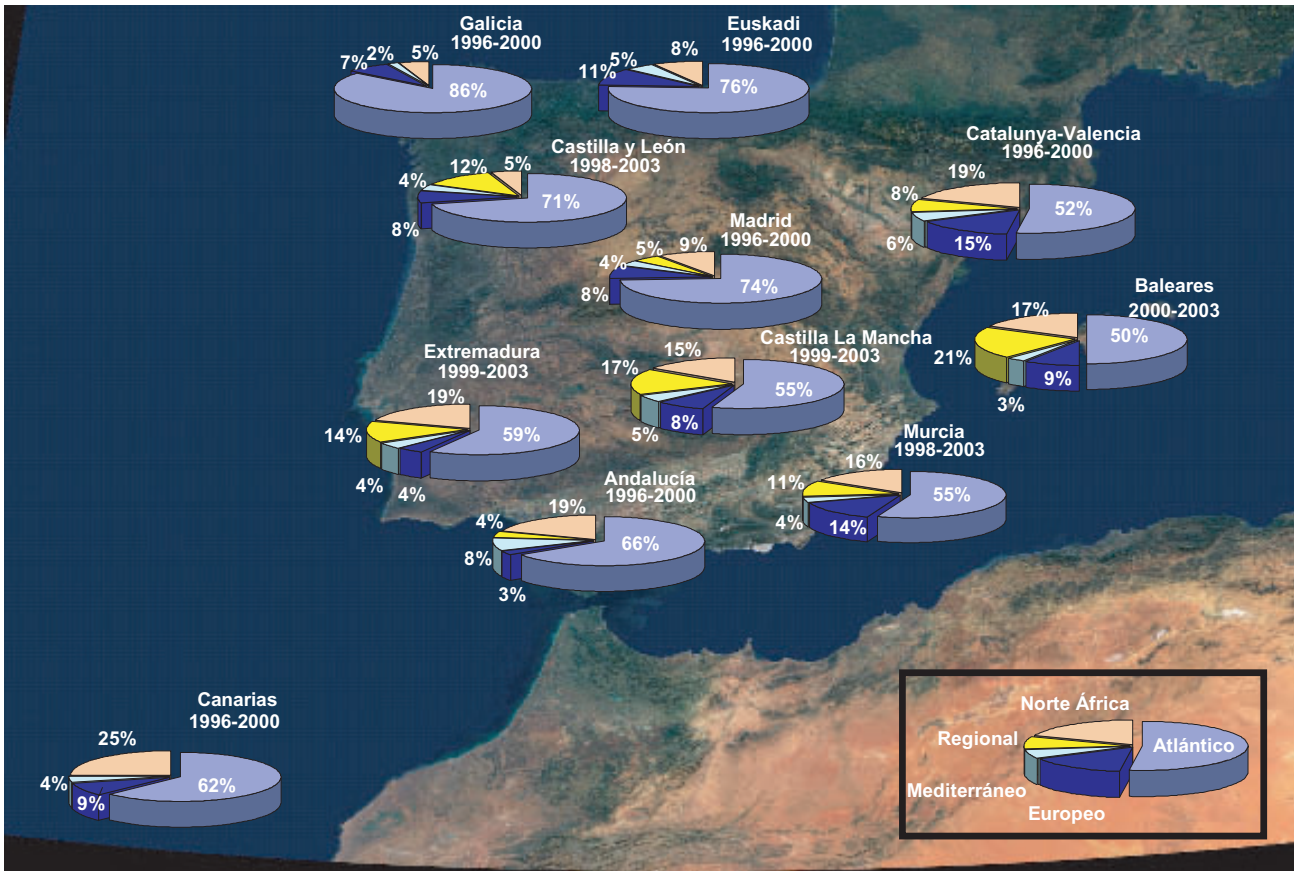
Por último, también se ha estudiado la influencia que los distintos patrones de transporte atmosférico han tenido sobre los niveles de concentración de partículas registrados. Para ello se han calculado retrotrayectorias de masas de aire a escala diaria con el modelo Hysplit (Draxler y Rolph, 2003) y se han analizado junto con la información obtenida a partir de los mapas de índice de aerosol y de carga de polvo en superficie y altura, proporcionados por el sensor TOMS-NASA y por los modelos NRL, SKIRON e ICoD-DREAM respectivamente (TOMS, <http://jwocky.gsfc.nasa.gov>; NRL, <http://www.nrlmry.navy.mil/aerosol>; SKIRON, <http://forecast.uoa.gr>; DREAM, <http://www.icod.org.mt/aerosol/dust>, actualmente <http://www.bsc.es/projects/earthscience/DREAM>), así como de las imágenes satélite proporcionadas por el proyecto SeaWIFS-NASA (<http://seawifs.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS.html>).

Tabla 1. Ubicación y características de las 28 estaciones de medida seleccionadas para este estudio.

Localización	Longitud	Latitud	Altitud (m.s.l.m.)	Tipo de estación	Periodo de muestreo
Alcobendas	03° 37' 39" W	40° 32' 42" N	667	Urbana	2001
Algeciras	05° 27' 07" W	36° 08' 16" N	24	Urbana-Industrial	2003-2004
Badajoz	06° 34' 48" W	38° 31' 48" N	188	Urbana	2004
Barcelona-CSIC	02° 07' 09" E	41° 23' 05" N	68	Urbana-Industrial	2002-2006
Barcelona-Sagrera	02° 11' 22" E	41° 25' 21" N	24	Tráfico-Industrial	2001
Becantes	08° 10' 50" W	43° 20' 15" N	170	Rural	2001
Borriana	00° 05' 10" W	39° 53' 38" N	20	Urbana-industrial	2005
Burgos	03° 38' 15" W	42° 20' 06" N	889	Suburbana	2004
Cartagena-Santa Ana	01° 00' 40" W	37° 39' 10" N	15	Suburbana-Industrial	2004
Cartagena-Bastarreche	00° 58' 28" W	37° 36' 14" N	20	Urbana-Industrial	2004
Huelva	05° 56' 24" W	37° 15' 21" N	10	Urbana-Industrial	2001
L'Alcora	00° 12' 43" W	40° 04' 07" N	175	Urbana-industrial	2002-2005
L'Hospitalet	02° 06' 40" W	41° 22' 23" N	70	Tráfico-Industrial	1999-2000
La Línea	05° 20' 49" W	36° 09' 37" N	1	Urbana-Industrial	2003-2004
Las Palmas	15° 24' 49" W	28° 08' 04" N	20	Urbana	2001
Llodio	02° 57' 44" W	43° 08' 42" N	122	Urbana-Industrial	2001
Los Barrios	05° 28' 55" W	36° 11' 02" N	45	Urbana –Industrial	2003-2004
Madrid	03° 40' 52" W	40° 25' 32" N	672	Tráfico	1999-2000
Mallorca	02° 35' 24" E	39° 35' 24" N	20	Suburbana	2004
Monagrega	00° 19' 15" W	40° 56' 23" N	600	Rural	1999-2000
Montseny	02° 22' 40" E	41° 46' 47" N	730	Rural	2002-2006
Morella	00° 05' 34" W	40° 38' 10" N	1154	Rural	2004
Onda	00° 15' 09" W	39° 57' 44" N	163	Suburbana-Industrial	2002-2005
Puertollano	04° 05' 19" W	38° 41' 64" N	670	Urbana-Industrial	2004
Santa Cruz	16° 14' 51" W	28° 28' 21" N	52	Urbana	2002-2006
Tarragona	01° 14' 52" E	41° 07' 29" N	20	Urbana-Industrial	2001
Valencia-El Saler	00° 19' 08" W	30° 20' 46" N	7	suburbana costera	2003-2004
Vila-real	00° 06' 21" W	39° 56' 30" N	60	Urbana-Industrial	2002-2005

RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Figura 2. Porcentaje relativo (en base anual) del origen de masas de aire transportadas hacia o en el interior de España.



Los vientos dominantes proceden del Atlántico oeste (A), pero también se incluyen vientos del sur procedentes de África (NAF), vientos del noreste del continente europeo (EU), una pequeña contribución de vientos del Mediterráneo (ME) y como factor común los flujos de viento de carácter regional que permiten la recirculación de los contaminantes en el interior peninsular (RE).

Según aparece representado en la Figura 2, los distintos escenarios de transporte atmosférico identificados a partir del análisis de retro-trayectorias de masas de aire, mapas de carga de polvo en superficie e índice de aerosol e imágenes satélite indican que la advección Atlántica domina en todo el territorio español, aunque su influencia disminuye de oeste a este y mitad sur peninsular (86% en el noroeste, 70-75% en la mitad norte, 65% en el sur y Canarias y 50-59% en el área mediterránea).

El transporte de masas de aire procedentes del norte de África es más frecuente en las Islas Canarias (25%) y en las áreas del sur y este del país (15-19 y 13-17% respectivamente), mientras que las áreas del centro (9%) y norte (8%) peninsular presentan una menor frecuencia de transporte desde este sector y

que va disminuyendo hacia el noroeste (5%). Los episodios de recirculación regional (Millán *et al.*, 1997) son más frecuentes en las áreas del mediterráneo (8-21%) y centro peninsular (12-17%), a excepción de Madrid (5%) que presenta valores similares a los del sur de la península (4%). En el Norte de España y en las Islas Canarias, estos episodios de contaminación regional son muy poco frecuentes (<1%). El transporte de masas de aire desde el continente europeo varía en el rango de frecuencias de 3-15 %, siendo lógicamente más comunes en las regiones del este y norte del país (hasta un 15%) que en áreas del sur y oeste (3-4%). Finalmente, el transporte de masas de aire procedentes de la cuenca mediterránea es ligeramente más frecuente en las áreas este y sur de la península Ibérica (8%) si se compara con otras regiones (5%).

NIVELES DE MATERIAL PARTICULADO

Dependiendo de las características del emplazamiento de medida, las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ (en $\mu g/m^3$) fueron incrementándose desde los siguientes rangos: 13-21 y 8-14 (estaciones EMEP, ver Tabla 2), 10-21 y 12-17 (rurales), 28-32 y 18-21 (urbanas), 28-47 y 19-21 (fondo urbano-industrial) hasta alcanzar 46-50 y 28-35 (tráfico intenso o “hotspots” de tráfico) (Figura 3 y Tablas 2 y 3). La actividad antropogénica afecta en gran medida a los niveles de contaminación atmosférica en las escalas temporales horaria y diaria. Este último caso está perfectamente ilustrado al comparar la media anual obtenida a partir del muestreo de 2 de los 5 días laborables ($49 \mu g/m^3$) y la obtenida a partir de los valores de todos los días del año ($40 \mu g/m^3$) en el emplazamiento de medida de Barcelona-CSIC.

Las concentraciones de $PM_{2.5}$ en un determinado emplazamiento constituyen generalmente el 40-75% de las de PM_{10} . La relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ (Figura 3) obtenida en la mayoría de los puntos del norte, noroeste y zona centro de España está dentro del rango 0.6-0.7, habiéndose registrado los valores más altos en las áreas más contaminadas. Esta relación disminuye hasta 0,5 y 0,4 en la mayor parte de emplazamientos urbanos y rurales del sur de la península y de las Islas Canarias respectivamente, aunque de nuevo los valores aumentan en los sitios más industrializados (0,6-0,7). La tendencia hacia una distribución granulométrica de mayor tamaño, que se muestra en la Figura 3, es probablemente el resultado de un mayor aporte de materia mineral en la fracción PM_{10} , como resultado de un clima más seco y la proximidad a las regiones desérticas de África.

En los emplazamientos de fondo rural y regional los niveles de PM muestran picos o máximos relativos de concentración coincidiendo con intrusiones de masas de aire africano, estancamiento regional atmosférico, y episodios de contaminación local. Hay una tendencia clara al incremento de los niveles en verano debido a los procesos de resuspensión, a menores niveles de precipitación, a una mayor frecuencia de episodios de polvo africano (Viana *et al.*, 2002; Escudero *et al.*, 2005) y a la mayor frecuencia de episodios regionales (Millán *et al.*, 1997). Esta última tendencia viene ilustrada en la Figura 4, que muestra la ocurrencia de manera regular de un máximo de PM_{10} en verano en los últimos 10 años en Monagrega, un emplazamiento localizado en el margen oriental de la zona centro peninsular, así como la ocurrencia de manera común de un pico en primavera y un mínimo en invierno (Rodríguez *et al.*, 2001, 2004; Moreno *et al.*, 2005).

Se ha calculado que el 85% de todas la superaciones diarias de PM_{10} ($>50 \mu gPM_{10}/m^3$) registradas en este emplazamiento de fondo regional durante este periodo, fueron causadas por intrusiones de polvo desértico norte africano. La situación inversa corresponde a áreas urbanas e industriales, en las que en la mayoría de los casos, alrededor del 70-80% de las superaciones son debidas exclusivamente a fuentes locales antropogénicas. En estas áreas, la tendencia estacional de los niveles de PM es opuesta a la descrita anteriormente para las áreas de fondo regional, con niveles máximos en invierno como resultado del predominio de las situaciones de estancamiento atmosférico.

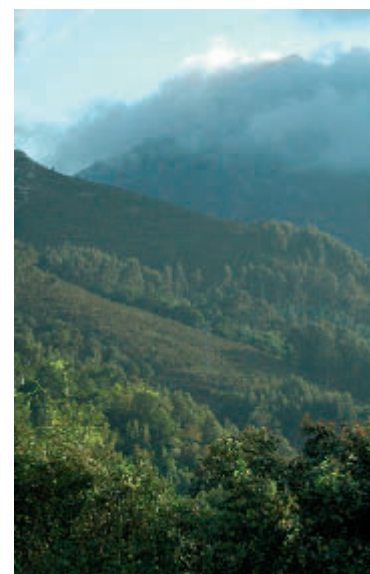


Tabla 2. Niveles medios anuales de PM_{2,5}, PM₁₀ y PST en las estaciones EMEP durante el periodo 1996-2005, número anual de medidas disponibles (N), y superaciones del valor límite diario de 50 µgPM₁₀/m³ y de los valores diarios arbitrarios de 35 µgPM_{2,5}/m³ y 70 µgPST/m³.

Estación		1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Media	N >70µgPST/m³	
		PST												
Viznar (Granada)		28	30	36	42	44	41	39				37	18-49/año	
Niembro (Asturias)					29	28	26	28				28	2-7/año	
Campisábalos (Guadalajara)				18	15	20	22	17				18	2-14/año	
Cabo de Creus (Girona)				33	41	37	40	35				38	6-35/año	
Barcarrota (Badajoz)					30	29	28	25				27	5-13/año	
Zarra (Valencia)					24	26	22	21				23	1-7/año	
Peñausende (Zamora)						17	19	18				18	1-4/año	
Els Torms (Lleida)							32	23				27	0-4/año	
Riscollano (Toledo)		17**	20**	24**	20**	20**	23	23				21	4-7/año	
O Saviñao (Lugo)							22	20				21	1-5/año	
	Ratio PST/PM ₁₀	PM ₁₀											N >50µgPM ₁₀ /m³	
Viznar (Granada)		1,8	15*	17*	20*	23*	24*	24	21	21	24	22	21	12-28/año
Niembro (Asturias)		1,4				21*	20*	20	19	20	16	17	19	1-10/año
Campisábalos (Guadalajara)		1,5			11*	9*	13*	14	11	12	13	12	12	0-10/año
Cabo de Creus (Girona)		1,8				21*	19*	20	19	25	21	21	21	0-15/año
Barcarrota (Badajoz)		1,5				18*	18*	19	16	17	19	19	18	0-10/año
Zarra (Valencia)		1,4				19*	14*	16	15	16	17	15	16	1-7/año
Peñausende (Zamora)		1,4					12*	15	12	13	13	13	13	1-6/año
Els Torms (Lleida)		1,5						19	15	20	22	17	19	1-16/año
Riscollano (Toledo)		1,6	10**	12**	14**	12**	12**	15	12	14	16	15	13	2-11/año
O Saviñao (Lugo)		1,4						16	14	15	14	14	15	1-5/año
	Ratio PM ₁₀ /PM _{2,5}	PM _{2,5}											N >35µgPM _{2,5} /m³	
Viznar (Granada)		1,9						12	10	9	11	11	11	0-3/año
Niembro (Asturias)		1,8						11	10	11	10	9	10	1-4/año
Campisábalos (Guadalajara)		1,5						9	7	7	8	8	8	0/año
Cabo de Creus (Girona)		1,5						12	13	17	13	12	14	2-15/año
Barcarrota (Badajoz)		1,6						11	12	8	11	10	11	0-7/año
Zarra (Valencia)		2,0						9	8	8	8	8	8	0/año
Peñausende (Zamora)		1,6						10	8	8	8	8	8	1-3/año
Els Torms (Lleida)		1,5						12	10	13	13	10	12	1-8/año
Riscollano (Toledo)		1,8						9	7	7	8	8	8	0-2/año
O Saviñao (Lugo)		1,5						12	9	9	9	10	10	1-2/año

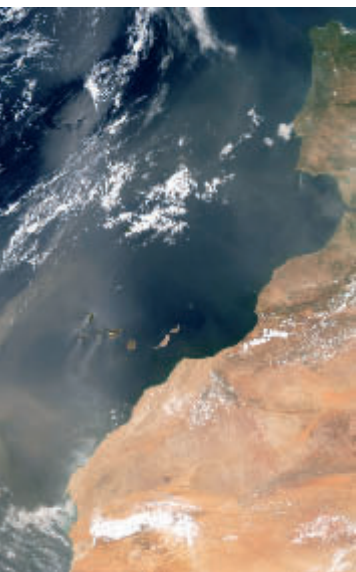
* Extrapolación de PM₁₀ mediante una relación PST/PM₁₀ correspondiente a la medida en cada sitio durante el periodo 2001-2003.
** S. Pablo de los Montes (Toledo)

Tabla 3. Rangos típicos de valores medios anuales (en µg/m³ y en % entre paréntesis) de PM₁₀ y PM_{2,5} y sus diferentes componentes, en España.

	PM ₁₀	Crustal	OM+EC	CIS	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺		Aerosol marino
Estaciones EMEP	13-21	ND	ND		2-4	1-2			
Fondo rural	19-21	2-5 (13-25%)	3-6 (13-29%)	5-8 (27-36%)	3-4 (15-18%)	1-3 (5-12%)	1,2-1,3 (6-7%)	Interior	0,7-1,7 (2-5%)
Fondo urbano	28-32*	6-9* (21-28%)	5-10 (18-33%)	5-8 (18-27%)	2-4 (8-14%)	1,9-2,5 (6-8%)	1,1-1,6 (3-6%)	Litoral & Baleares	1,5-4,9 (3-12%)
Fondo urbano-industrial	28-47	7-16+ (20-47%)	4-12 (12-26%)	6-13 (19-33%)	4-7 (12-19%)	1,1-5,5 (4-11%)	0,7-2,4 (2-6%)		
Hotspots Tráfico/industrial	46-50	13-15 (26-33%)	11-18 (25-37%)	8-15 (16-31%)	4-7 (9-14%)	2-6 (4-12%)	1,2-2 (3-5%)	Canarias	10-12 (25-27%)
PM _{2,5}									
Estaciones EMEP	8-14	ND	ND						
Fondo rural	12-17	1,5-2,1 (11-12%)	4-5 (27%)	4-6 (31-36%)	2-3 (17-21%)	0,5-2 (3-11%)	1,2-1,4 (8-9%)	Interior	0,5-0,8 (1-4%)
Fondo urbano	18-25	2-3 (11-17%)	5-9 (25-37%)	4-6 (21-36%)	2-4 (11-20%)	0,4-1,3 (2-6%)	0,7-1,9 (4-11%)	Litoral & Baleares	0,3-1,7 (2-5%)
Fondo urbano-industrial	19-29	2-5 (9-22%)	4-11 (18-35%)	5-11 (22-33%)	4-5 (13-20%)	0,5-3,5 (3-10%)	0,9-2,5 (4-9%)		
Hotspots Tráfico/industrial	28-35	4-6 (12-16%)	12-17 (38-51%)	7-13 (19-37%)	4-6 (11-17%)	1-4 (4-11%)	1,4-3,2 (4-9%)	Canarias	1,4-1,6 (6-9%)

* Se ha excluido las Palmas de Gran Canaria (44 µgPM₁₀/m³) debido al gran aporte de materia mineral, producido por las frecuentes intrusiones de polvo africano, así como de aerosol marino (12 µgPM₁₀/m³). También se ha excluido la contribución crustal en Cartagena-Santa Ana debido a los trabajos de construcción que se realizaron próximos al emplazamiento de muestreo durante el periodo de estudio.

+ Carga crustal 7-12 µg/m³ (20-34%) si se excluye el área cerámica.

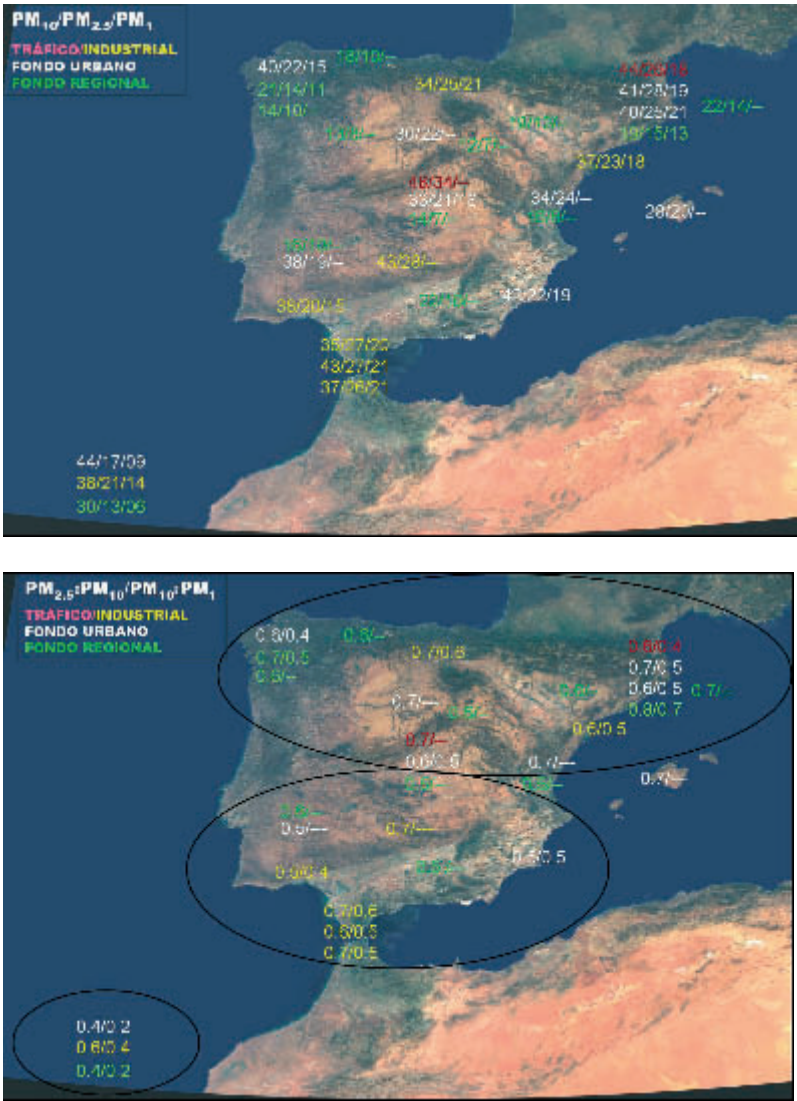


COMPONENTES MAYORITARIOS

La concentración de partículas carbonosas (materia orgánica y carbono elemental) para las fracciones gruesa y fina aumenta desde los niveles mínimos en estaciones de fondo de 3-6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (áreas rurales) hasta 5-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para la mayoría de los emplazamiento urbanos y suburbanos, a excepción de los *hotspots* de tráfico intenso en las ciudades (hasta 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Madrid) y la ciudad de Puertollano afectada por la industria petroquímica y la minería del carbón, en la que los niveles superan normalmente los 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles más altos están asociados con una fuerte influencia del tráfico (Madrid y Barcelona: Figura 5 y Tabla 4). Además

de esta influencia del tráfico y la industria existen variaciones estacionales discernibles en prácticamente todas las estaciones, con un máximo de partículas carbonosas en invierno (en ambas fracciones) relacionado con las condiciones de baja capacidad de dispersión de la atmósfera en esa época del año. Esto contrasta con un mínimo apreciable en verano, atribuido a la baja densidad de tráfico y las condiciones de mezcla favorables, que también se observa en las Islas Canarias, debido en este caso al reforzamiento de los vientos alisios que favorecen la dispersión de contaminantes locales. Las relaciones OC/(OC+EC) en puntos urbanos en

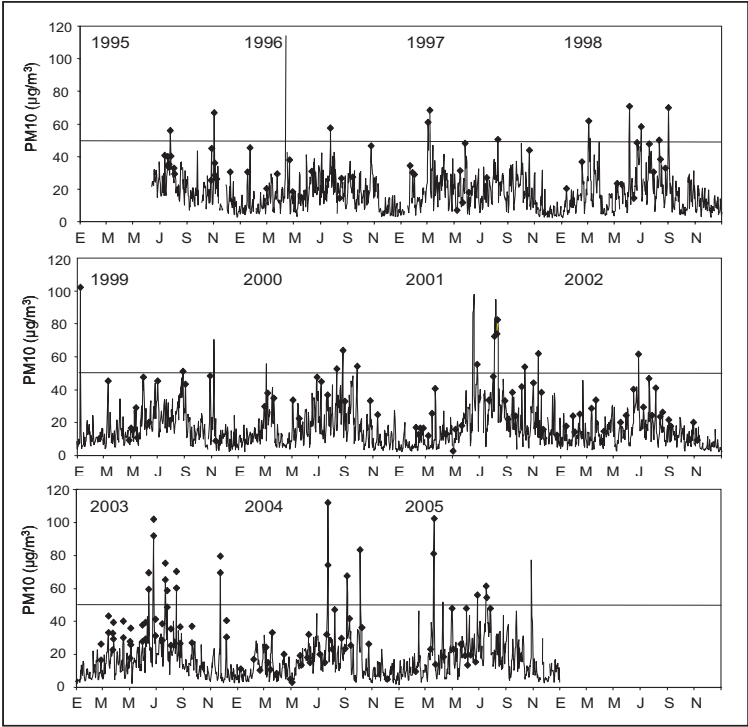
Figura 3. Concentraciones promedio de a) PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_1 (disponible en algunos casos) en todas las estaciones indicando su ubicación regional, urbana o tráfico/industrial, y b) Relaciones $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ y $\text{PM}_1/\text{PM}_{10}$. Los datos de fondo regional incluyen las estaciones EMEP en España.



España son altas (0.6-0.8). Si los vehículos diesel son una de las principales fuentes de emisiones debidas al tráfico, y se caracterizan, según los estudios existentes, por una relación OC/EC baja, se aprecia una contradicción entre el impacto teórico de estas emisiones en los niveles de PM y en su especiación química. No obstante, hay que

tener en cuenta que las medidas de las emisiones de los vehículos diesel en banco de pruebas se realizan a una temperatura de 51 °C. En estas condiciones se pueden infravalorar las emisiones de precursores de fases secundarias de OC, por lo que se infravaloraría el ratio OC/EC de las emisiones del tráfico

Figura 4. Niveles de PM₁₀ registrados desde 1995 a 2005 en la estación de fondo regional de Monagrega y su relación con la ocurrencia de intrusiones de polvo africano (rombos negros), más frecuentes durante el verano y en los meses de febrero-marzo. De las 60 superaciones registradas durante estos años, 50 fueron producidas por intrusiones de polvo africano. VLD: valor límite diario.



En marcado contraste con el fraccionamiento de las partículas carbonosas hacia las fracciones finas, aquellos elementos normalmente asociados a partículas minerales como silicatos, carbonatos, óxidos y fosfatos (“partículas crustales o minerales”) se encuentran de manera más abundante en la fracción gruesa (PM_{2.5-10}). Estos componentes del PM₁₀ aumentan su concentración desde <6 µg/m³ en estaciones de fondo rural, a 6-8 µg/m³ en emplazamientos suburbanos hasta los >8 µg/m³ en prácticamente el resto de los sitios (Figura 5, Tabla 4). A excepción del área cerámica (Onda, Vila-real, Borriana y L’Alcora), donde se ha registrado una carga de materia mineral entre 9 y 16 µg/m³ de media anual, los valores más altos (13-15 µg/m³) se han alcanzado en los sitios urbanos de tráfico intenso o “hotspots” y cerca de las fuentes industriales de emisiones primarias. Obviamente la fracción mineral en PM_{2.5} es también elevada cerca de los sitios de tráfico intenso y en emplazamientos industriales específicos (4-6 µg PM_{2.5}/m³), aunque las concentraciones son siempre mucho más bajas que en PM₁₀. Sin embargo, a pesar

de esta disminución es importante destacar las todavía altas concentraciones de partículas crustales en la fracción fina (PM_{2.5} y por tanto con mayor capacidad para ser inhaladas) en los emplazamientos de fondo urbano y de tráfico intenso, donde los niveles varían en el rango de 2 a 3 y de 4 a 6 µg/m³, respectivamente, así como en algunas estaciones de fondo urbano en Canarias (cerca de las fuentes africanas de emisión de polvo) que han registrado valores de 3 a 5 µg/m³.

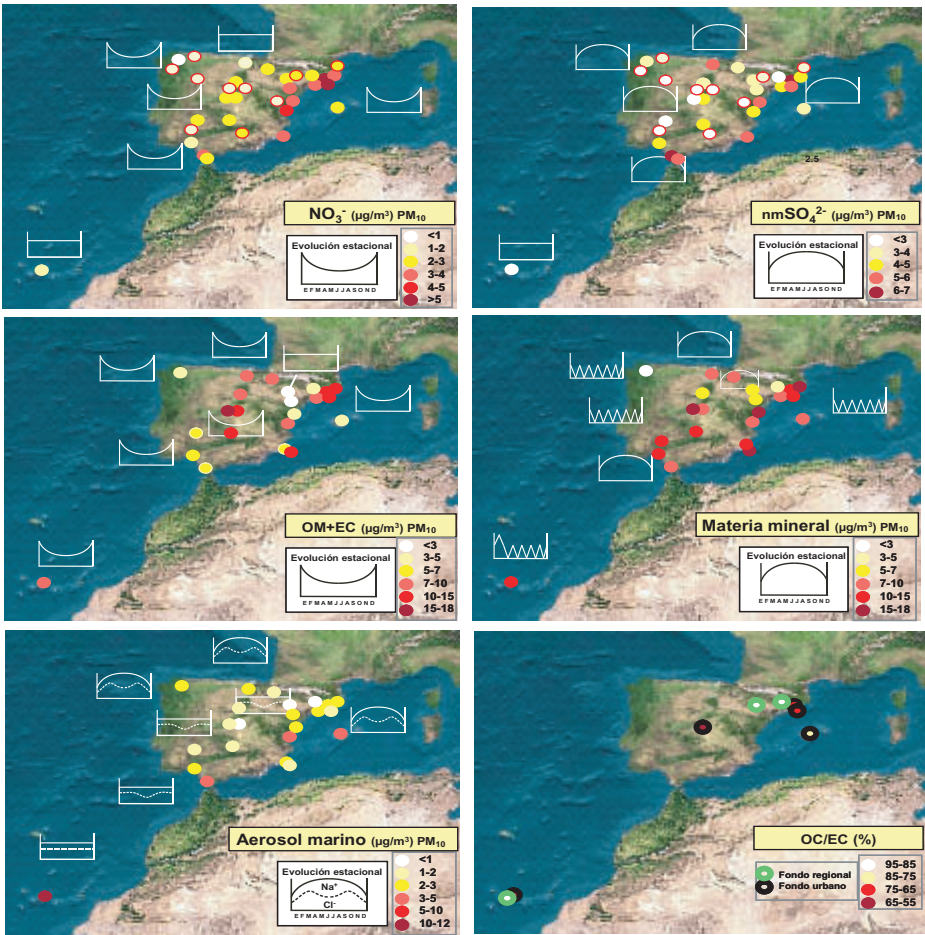
En el caso del aerosol marino se observa la misma preferencia por la fracción gruesa. Tal como era de esperar, los niveles de aerosol marino son especialmente reducidos en el interior peninsular (alrededor de 1 µg/m³) y se duplican en entornos costeros, alcanzando 11.5 µg/m³ en la estación de Las Palmas de Gran Canaria (Figura 5 y Tabla 4). La contribución del aerosol marino en PM₁₀ en las estaciones ubicadas en la costa atlántica es superior a la registrada en las estaciones del Mediterráneo, con niveles de hasta 7 µg/m³ como promedio anual (Visser *et al.*, 2001). Los niveles de Na⁺ y Cl⁻ en PM₁₀ en Canarias

Tabla 4b. Composición de PM2.5 en diferentes zonas de España.

μg/m³	CAR-SA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR-BA				CAR			
-------	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	--------	--	--	--	-----	--	--	--

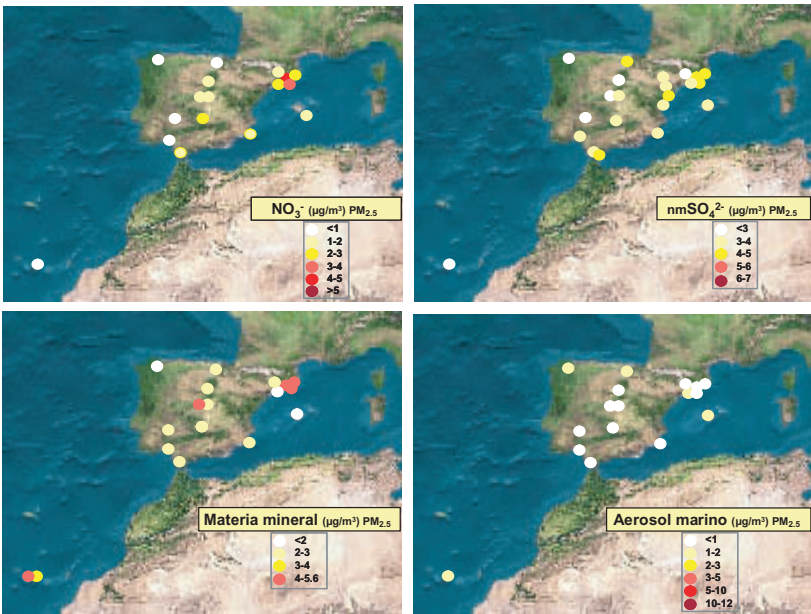
N, número de muestras; OC+EC, carbono orgánico + carbono elemental; nmSO₄²⁻, sulfato no marino, CIS: compuestos orgánicos secundarios. ND: Sin datos. * Valor en días laborales, entre paréntesis valor promedio incluyendo fines de semana. MON, Monagrega; BEM, Bementes; MONT, Montseny; MOR, Morella; SAL, El Saler-Valencia, BU, Burgos; PM, Palma de Mallorca; CAR-SA, Cartagena Santa Ana; OND, Onda; ALC, Alcobendas; BA, Badajoz; LPM, Las Palmas de Gran Canaria; L'AL, L'Alcora; BCN-CSIC, Barcelona CSIC; HUE, Huelva; ALG, Algeciras; LBAR, Los Barrios; LIN, La Línea; VLR, Vila-real; LLO, Llodio; PUE, Puertollano; STC, Santa Cruz de Tenerife; CAR-BA, Cartagena-Bastarache; T, Tarragona; M, Madrid; L'H, L'Hospitalet; BCN-SAG, Barcelona Sagrera. #Cartagena-Santa Ana registra valores altos de aporte mineral debido a los trabajos de construcción próximos a la estación de medida durante el período de estudio.

Figura 5a. Distribución espacial de los niveles de NO_3^- , SO_4^{2-} no marino, OM+EC, materia mineral y aerosol marino ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), así como % de OM en TC ($\text{TC}=\text{OM}+\text{EC}$) en la fracción PM_{10} . La evolución estacional de estos compuestos se muestra en los gráficos correspondientes.



*Zabalza et al. 2006. #Plaza et al. 2006

Figura 5b. Distribución espacial de los niveles de NO_3^- , SO_4^{2-} no marino, materia mineral y aerosol marino ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en la fracción $\text{PM}_{2.5}$. La evolución estacional de estos compuestos se muestra en los gráficos correspondientes.

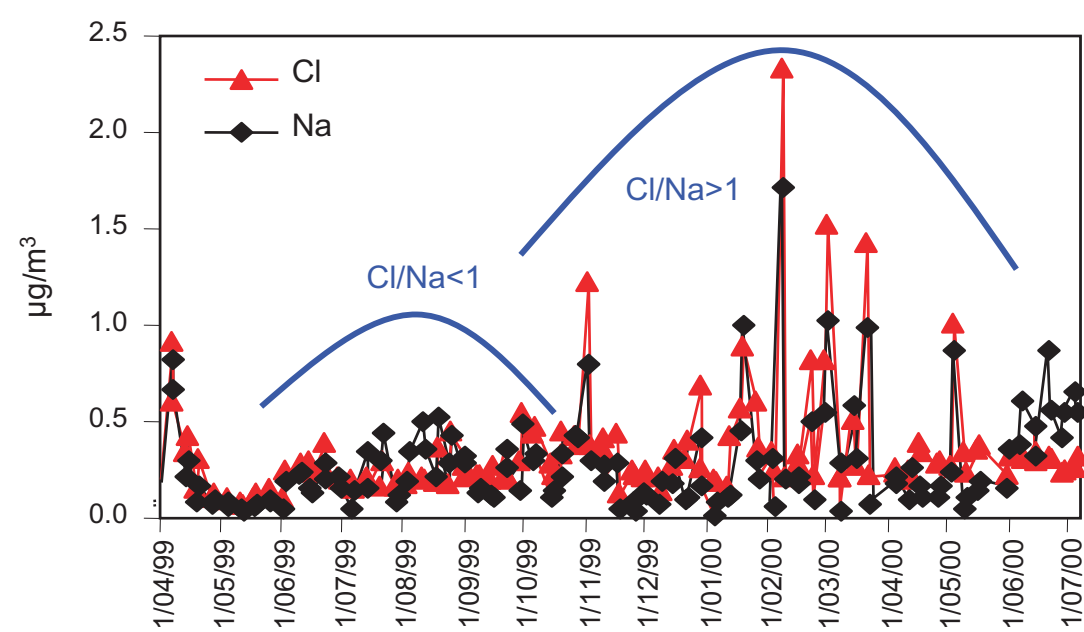


no presentan ninguna tendencia estacional definida, lo cual contrasta con lo observado en las estaciones peninsulares, en las que se aprecian dos tendencias claramente diferenciadas. La primera de ellas se observa en las estaciones costeras (a excepción de Huelva), en las que los niveles de Na^+ maximizan en verano debido a la mayor intensidad de las circulaciones de brisa marina, mientras que los niveles de Cl^- presentan un descenso en los meses de verano como consecuencia de su volatilización en forma de HCl durante la formación de NaNO_3 por reacción entre HNO_3 gaseoso y NaCl . La segunda tendencia se observa en las estaciones del interior peninsular (Madrid, Monagrega), donde los aportes de aerosol marino se producen de forma relativamente constante a lo largo del año, con independencia de la brisa marina y asociados especialmente al paso de frentes atlánticos. En estos casos los ratios Cl^-/Na^+ también disminuyen en verano tras la volatilización de Cl^- en forma

de HCl , como se muestra en la Figura 6 que representa el mínimo estival característico de Cl^- en una estación del interior peninsular (Monagrega).

Los niveles de compuestos inorgánicos secundarios (sulfato, nitrato y sales de amonio) en PM_{10} son $<8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la mayoría de las estaciones de muestreo, aunque superan el valor de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en varias de las estaciones industriales y de tráfico. El porcentaje de estas fases en la fracción fina es superior a la gruesa (generalmente 65-85% del contenido en PM_{10} está presente en $\text{PM}_{2.5}$, Figura 5 y Tabla 4). Los niveles de sulfato no marino en PM_{10} (mayoritariamente $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) son inferiores en estaciones rurales, suburbanas y de fondo urbano ($<4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que en estaciones de tráfico e industriales ($4\text{-}7 \mu\text{g}/\text{m}^3$), y el porcentaje de sulfato en la fracción $\text{PM}_{2.5}$ es siempre mayor que en la gruesa (70% en $\text{PM}_{2.5}$). En la Península Ibérica los niveles de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

Figura 6. Niveles de los componentes del aerosol marino en la estación de fondo regional del interior peninsular de Monagrega, entre abril de 1999 y julio de 2000. Se observa cómo los niveles de Cl^- superan los de Na^+ durante los meses de invierno, mientras que los niveles de Na^+ son superiores a los de Cl^- en verano.



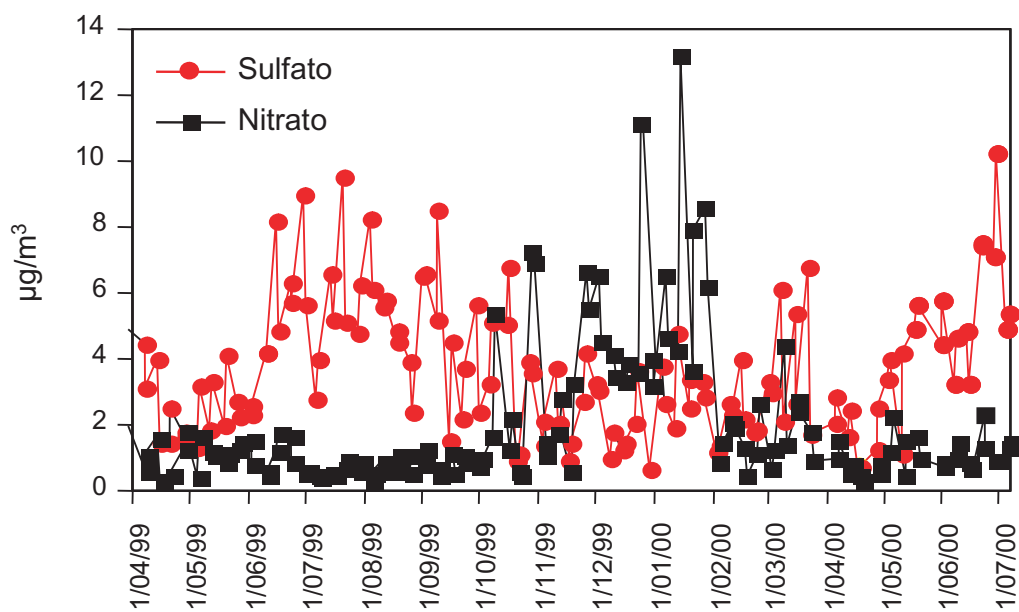
maximizan en verano (Figuras 5 y .7) debido a la mayor insolación y consecuentemente la mayor tasa de oxidación de SO_2 a SO_4^{2-} . En Canarias, por el contrario, no se observa ninguna tendencia estacional definida, y ello se debe a que gran parte del sulfato detectado no procede de fuentes locales sino de emisiones de zonas urbanas e industriales en la Península y en Europa, que son transportadas sobre el océano hacia Canarias por los vientos Alisios (McGovern *et al*, 2002).

Los niveles de nitrato se caracterizan por presentar un marcado gradiente espacial a través de la Península Ibérica que alcanza su máximo en la costa mediterránea, y que es independiente de las emisiones a escala local o regional de los precursores gaseosos de este compuesto (Figura 5). Este gradiente se observa al margen del tipo de estación, ya que estaciones industriales de características similares (por ejemplo, Huelva y Tarragona) presentan niveles

medios de nitrato muy diferentes (2 y 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM_{10} respectivamente). Una posible explicación para este gradiente espacial se apoya en los mayores niveles de amonio (NH_4^+) característicos de la costa mediterránea y en especial del NE peninsular, consecuencia de las emisiones agrícolas y ganaderas (EPER, 2001). De este

modo, los máximos niveles de nitrato (4-6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) se detectan en áreas altamente industrializadas y urbanas del Mediterráneo mientras que en el resto de estaciones industriales (estaciones en la costa atlántica como Huelva o cantábrica como Llodio), urbanas y regionales se registran niveles de nitrato entre 2-3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y los niveles mínimos

Figura 7. Niveles de sulfato y nitrato en la estación de fondo regional de Monagrega entre abril de 1999 y julio de 2000. La evolución estacional muestra dos tendencias opuestas, con un máximo invernal de nitrato y un máximo estival de sulfato.



se registran en la estación rural del Norte de la península (Bemantes, 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). La variación estacional de este compuesto muestra un mínimo estival y máximos invernales, al contrario que lo observado para los niveles de sulfato (Figura 7). Esta tendencia es probablemente debida a la conocida inestabilidad térmica de NH_4NO_3 en verano, cuando las altas temperaturas favorecen la formación de HNO_3 (Adams *et al.*, 1999, Pakkanen *et al.*, 1999; Schaap *et al.*, 2002). Esta interpretación se ve confirmada por la ausencia de tendencia estacional de este compuesto en el Norte de la Península Ibérica y en Canarias, donde el contraste de temperaturas entre invierno y verano es menor que en otras regiones.

Es interesante destacar que, en comparación con estudios llevados a cabo en Europa del Norte y central (CE, 2004), en las estaciones españolas se observa un porcentaje elevado de nitrato en la fracción gruesa de PM_{10} . Este incremento de nitrato grueso puede ser debido a la presencia de HNO_3 gaseoso y a su interacción con carbonato cálcico mineral y con el aerosol marino. El porcentaje de nitrato en la fracción

fina es siempre inferior al porcentaje en la gruesa (generalmente entre 25-75%), como consecuencia del mayor diámetro de partícula de especies como NaNO_3 y $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (2.5-5.0 μm , Querol *et al.*, 1998). En Canarias, dados los elevados niveles de aerosol marino, la mayor parte del nitrato se encuentra en forma de NaNO_3 (en lugar de NH_4NO_3). Los niveles de nitrato en Canarias son similares a los registrados en el Oeste de la Península Ibérica, y una vez más no se observa ninguna tendencia estacional.

Los niveles de amonio en las fracciones PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ son inferiores a 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabla 4) en todas las estaciones excepto aquellas de Barcelona y Puertollano, y al contrario que la mayoría de los elementos descritos anteriormente, este compuesto no muestra preferencia por ninguna de las dos fracciones granulométricas. Los niveles de amonio presentan un mínimo estival debido a la inestabilidad térmica de NH_4NO_3 . En invierno, por el contrario, este compuesto es estable en fase particulada, y su acumulación se ve favorecida por la menor capacidad dispersiva de la atmósfera.

ELEMENTOS TRAZA

La Tabla 5 y la Figura 8 muestran los rangos de concentración de los elementos traza determinados en las 3 estaciones rurales, 10 de fondo urbano, 1 estación urbana bajo influencia de industrias del acero en el Norte de España, 1 estación urbana bajo influencia de industrias del acero inoxidable en el Sur de España, 1 estación urbana bajo influencia de la metalurgia del cobre en el SO peninsular, 1 estación urbana bajo influencia de la metalurgia del zinc en el SE peninsular, 5 estaciones urbanas bajo influencia de las emisiones de complejos petroquímicos, y 4 estaciones bajo influencia de las emisiones de la industria cerámica en el Este peninsular. Estos rangos de concentración constituyen una herramienta de gran utilidad para la evaluación de la calidad del aire en áreas industriales con respecto a los niveles de elementos traza para los que no existen valores límite u objetivo en la legislación actual.

En los entornos con menores niveles de contaminación (Monagrega, Bemantes y Montseny), los niveles de la mayoría de los elementos se encuentran entre 0,1-10 ng/m³, y únicamente Zr, Mo, Ni, V, Ti, Ba, Cu, Pb, Zn (en orden creciente) superan el valor de 1 ng/m³. Los niveles de los elementos traza incrementan con el grado de contaminación de origen antropogénico, hasta alcanzar a registrarse en algunas ocasiones niveles de Ti, Cr, Mn, Cu, Zn, As, Sn, W y Pb 10 veces superiores a los registrados en estaciones de fondo rural.

Las Figuras 9 y 10 representan la comparación entre los rangos de concentración de cada elemento habituales para las estaciones urbanas y los niveles registrados en los diferentes tipos de estación industrial descritos anteriormente. Como resultado de esta comparación es posible extraer las siguientes conclusiones:

1. Los niveles de Cu y Sb son relativamente elevados en entornos urbanos en comparación con las estaciones industriales. Estos niveles elevados se deben probablemente al hecho de que estos elementos son componentes habituales de los frenos de los automóviles, y por tanto sus concentraciones son más elevadas en entornos urbanos con mayor densidad de tráfico. Cu, Sb, Fe y Zn son componentes mayoritarios de los frenos y neumáticos de los vehículos.
2. Los niveles de Cr, Mn, Ni, Zn, Mo, Se, Sn y Pb son relativamente elevados en áreas bajo la influencia de industrias del acero.

3. Los niveles de V, Cr, Ni y Mo son relativamente elevados en áreas bajo la influencia de industrias dedicadas a la producción de acero inoxidable. Los niveles de V y Ni en esta zona (La Línea y Algeciras) podrían estar también relacionados con las emisiones de complejos petroquímicos y con la combustión de fuel-oil (centrales térmicas y/o transporte marítimo).
4. Los niveles de As, Bi y Cu son relativamente elevados en zonas bajo influencia de la metalurgia del cobre.
5. Los niveles de Zn son relativamente elevados en zonas bajo la influencia de la metalurgia del zinc. Los niveles de V y Ni algo elevados en la zona en cuestión (Cartagena) podrían relacionarse con la presencia de un complejo petroquímico y la combustión de fuel-oil de una central térmica.
6. Los niveles de V y Ni son relativamente elevados únicamente en una de las zonas bajo influencia de complejos petroquímicos (Algeciras-La Línea), y no en el resto (Cartagena, Huelva, Puertollano y Tarragona) en las que los niveles de estos dos elementos se encuentran dentro del rango habitual en estaciones urbanas. Como se ha descrito anteriormente, los niveles de V y Ni en Algeciras y la Línea pueden estar también asociados a la combustión de fuel-oil, las emisiones de centrales térmicas en la zona o al tráfico marítimo en el Estrecho de Gibraltar.
7. El área de producción cerámica en el Este peninsular se caracteriza por los elevados niveles de Zn, As, Se, Zr, Cs, Tl y Pb, que resultan de la producción y uso de componentes de esmaltes cerámicos.

En la Figura 11 se representa la variabilidad de la composición de PM₁₀ y PM_{2,5} en cuanto a elementos traza que se ordenan en función de su toxicidad: elevada (Pb, As, Cd), media (Ni, Cu, Zn) y baja (Ti, Ba, Sr). La Figura muestra cómo la mayor parte de las muestras se distribuye en el sub-triángulo Ni-Cu-Zn, lo cual destaca los elevados niveles de Zn y Cu en todas las estaciones excepto en Canarias. Las nubes de puntos se concentran también en torno al eje derecho, que se atribuye al componente crustal (especialmente para Canarias, Santa Ana, Badajoz y Puertollano), con Ti presente en óxidos de hierro y materiales procedentes de silicatos, y Ba presente en feldespatos y carbonatos. El fuerte carácter crustal del material particulado en Canarias queda bien reflejado aquí. En otras



estaciones como Santa Ana este carácter crustal se encuentra ligado a procesos de resuspensión o construcción/demolición en el entorno del punto de muestreo. Al contrario de lo esperado, en el área cerámica se detecta una mayor influencia de los metales pesados con respecto a los elementos crustales. Ello sugiere una mayor influencia de las emisiones de metales generadas durante la producción y uso de aplicación de componentes de esmaltes cerámicos.

De este modo, se aprecia que las diferentes estaciones españolas presentan distintos perfiles característicos en cuanto a las mezclas de elementos traza. Es importante destacar que los niveles en aire ambiente de los elementos traza crustales (Cs, Sr, Ti entre otros) en PM_{2,5} alcanzan únicamente el 20-40% de los niveles en PM₁₀, un porcentaje que por el contrario incrementa hasta 60, 65, 70 y 80% para As, Ni, Pb y Cd, respectivamente (Figura 12).

Tabla 5. Rangos de concentración anual de elementos traza (ng/m³) en PM₁₀ determinados en estaciones rurales y de fondo urbano en España, así como en áreas bajo influencia de diferentes tipos de industria. Se resaltan en negrita los trazadores de los diferentes tipos de emisiones.

ng/ m³	Fondo rural		Fondo urbano		Acero	Acero inoxidable	Metalurgia cobre	Metalurgia zinc	Petroquímica		Cerámica	
	min	max	min	max	media	media	media	media	min	max	min	max
Li	0,1	0,3	0,2	0,7	0,4	0,6	0,2	0,4	0,2	1,0	0,6	1,3
Be	0,01	0,02	0,02	0,05	0,06	0,03	0,07	0,06	0,01	0,07	0,02	0,05
Sc	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,10	0,1	0,3	0,3	0,5
Ti	7	22	18	83	24	36	60	31	23	62	33	57
V	2	5	2	15	8	28	7	11	7	25	4	5
Cr	1	2	2	8	25	24	2	2.9	2	6	3	8
Mn	5	5	4	23	87	17	11	12	8	11	6	8
Co	0,1	0,1	0,2	0,5	0,5	0,6	0,4	0,3	0,2	0,8	0,4	0,7
Ni	2	3	2	7	33	20	3	6.7	3	11	3	5
Cu	4	8	7	81	33	11	70	18	23	33	4	10
Zn	16	30	14	106	417	73	51	504	35	54	45	183
Ga	0,1	0,2	0,1	0,3	0,4	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,2	0,3
Ge	0,1	0,3	0,04	0,3	0,2	0,3	0,1	0,04	0,1	0,2	0,03	0,1
As	0,3	0,4	0,3	1,5	1,8	0,9	5	1,0	0,5	1,9	1,7	5
Se	0,3	0,5	0,3	1,1	3	0,8	1,5	0,6	0,5	0,6	1,0	3
Rb	0,5	0,6	0,5	1,8	1,1	0,8	1,5	0,9	0,6	1,6	1,2	2,4
Sr	1	5	3	10	3	6	4	7.8	4	5	3	5
Y	0,1	0,1	0,1	0,4	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,3	0,2	0,3
Zr	4	4	2	10	2	5	2	1.7	2	6	10	20
Nb	0,04	0,1	0,05	0,4	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,2	0,3
Mo	2	3	2	5	15	15	2	1.7	2	7	1	2
Cd	0,2	0,2	0,1	0,7	1,2	0,3	0,8	0,7	0,1	0,8	0,6	1,5
Sn	1	2	1	6	38	1	2	2.0	2	2	1	1
Sb	0.6	0.6	1	11	4	1	3	3.4	1	7	1	6
Cs	0,01	0,04	0,03	0,13	0,1	0,1	0,1	0,06	0,04	0,2	0,1	0,3
Ba	5	11	4	41	14	15	16	16	12	16	12	16
La	0,1	0,2	0,2	0,6	0,3	0,6	0,5	0,3	0,3	0,9	0,3	0,6
Ce	0,2	0,4	0,4	1,3	0,4	0,7	0,9	0,7	0,5	1,2	0,7	1,9
Pr	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08	0,1	0,2	0,1	0,2
Hf	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2	0,4
W	0,01	0,03	0,05	0,6	0,7	0,2	0,06	0,07	0,04	0,2	0,10	0,3
Tl	0,1	0,1	0,05	0,4	0,3	0,01	0,2	0,1	0,03	0,3	0,5	2,8
Pb	5	10	7	57	102	13	37	20	8	37	35	103
Bi	0,1	0,1	0,1	1,0	0,5	0,1	1,6	0,2	0,1	0,2	0,4	1,5
Th	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1	0,4	0,1	0,2
U	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1

El valor límite anual de 500 ng/m³ establecido para Pb en 2005 por la directiva 1999/30/CE, no se supera en ninguna de las estaciones de muestreo. Las concentraciones de Pb en entornos urbanos son generalmente inferiores a 30 ng/m³. En cuanto a As, Cd y Ni, los valores objetivo establecidos por la directiva 2004/107/CE (6 ngAs/m³, 5 ngCd/m³ y 20 ngNi/m³) se superaron únicamente en escasas ocasiones para Ni en zonas donde haya influencia de las emisiones

de la producción de acero. Los niveles de As en algunas de las estaciones se encuentran próximos al nivel objetivo, aunque sin superarlo desde 2005. A partir de estos datos, se concluye que en el futuro próximo parece improbable que las estaciones españolas se encuentren en dificultades frente al cumplimiento de requisitos establecidos por directivas europeas de calidad del aire referentes a niveles de elementos traza en aire ambiente.

Figura 8. Rangos de concentración anual de elementos traza (ng/m³) en PM₁₀ determinados en estaciones rurales y de fondo urbano en España.

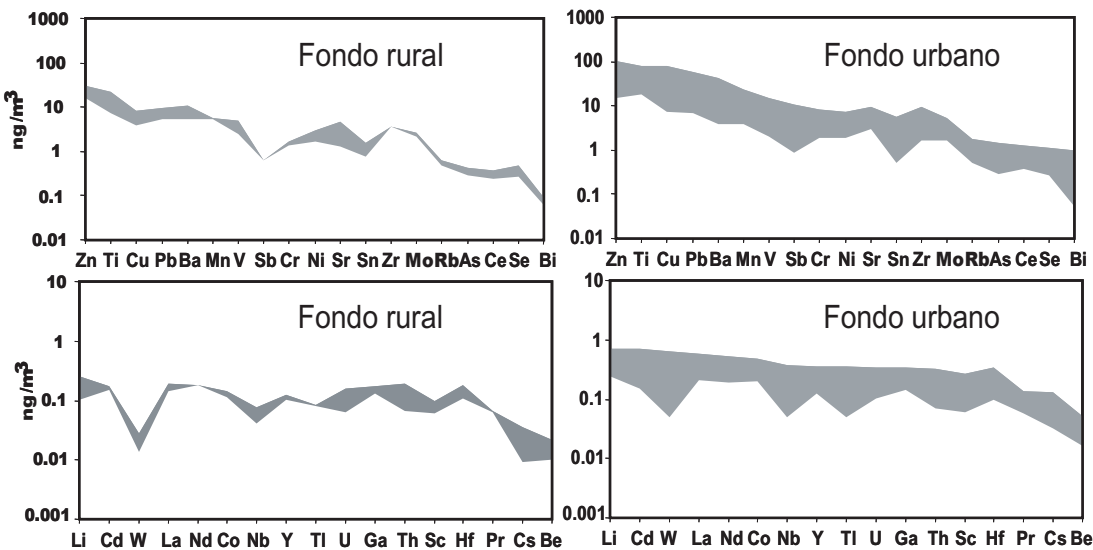


Figura 9. Rangos de concentración anual de elementos traza (ng/m³) en PM₁₀ determinados en estaciones de fondo urbano en España, y comparación con niveles medios de elementos traza determinados en áreas de producción cerámica.

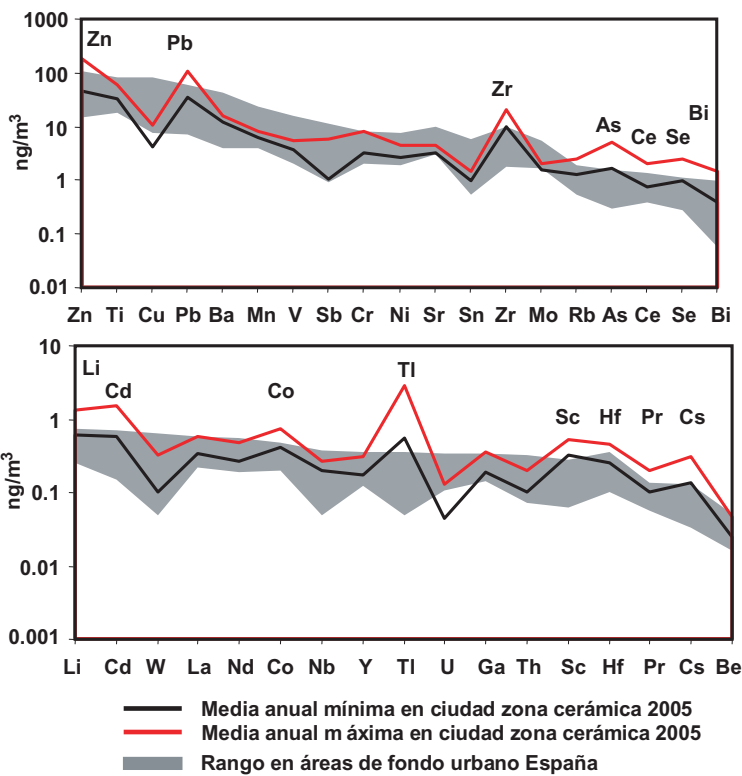


Figura 10. Rangos de concentración anual de elementos traza (ng/m^3) en PM_{10} determinados en estaciones de fondo urbano en España, y comparación con niveles medios de elementos traza determinados en cuatro entornos industriales con influencia de distintos tipos de metalurgia y en áreas bajo influencia de complejos petroquímicos (5 estaciones).

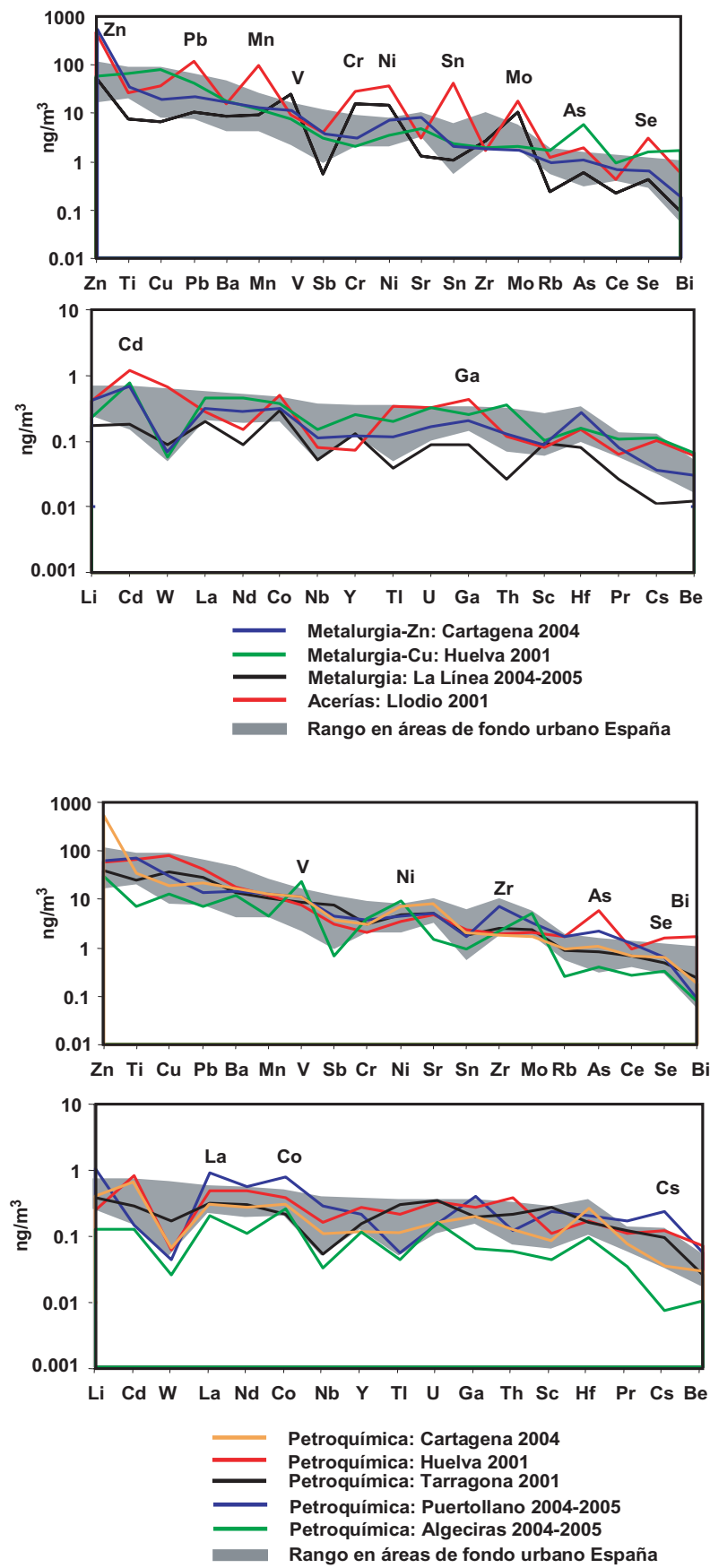


Figura 11. Comparación entre los niveles de determinados elementos traza en todas las estaciones. Los elementos se agrupan en función de sus posibles efectos sobre la salud, desde más (Pb-As-Cd) a menos (Ti-Ba-Sr) nocivos.

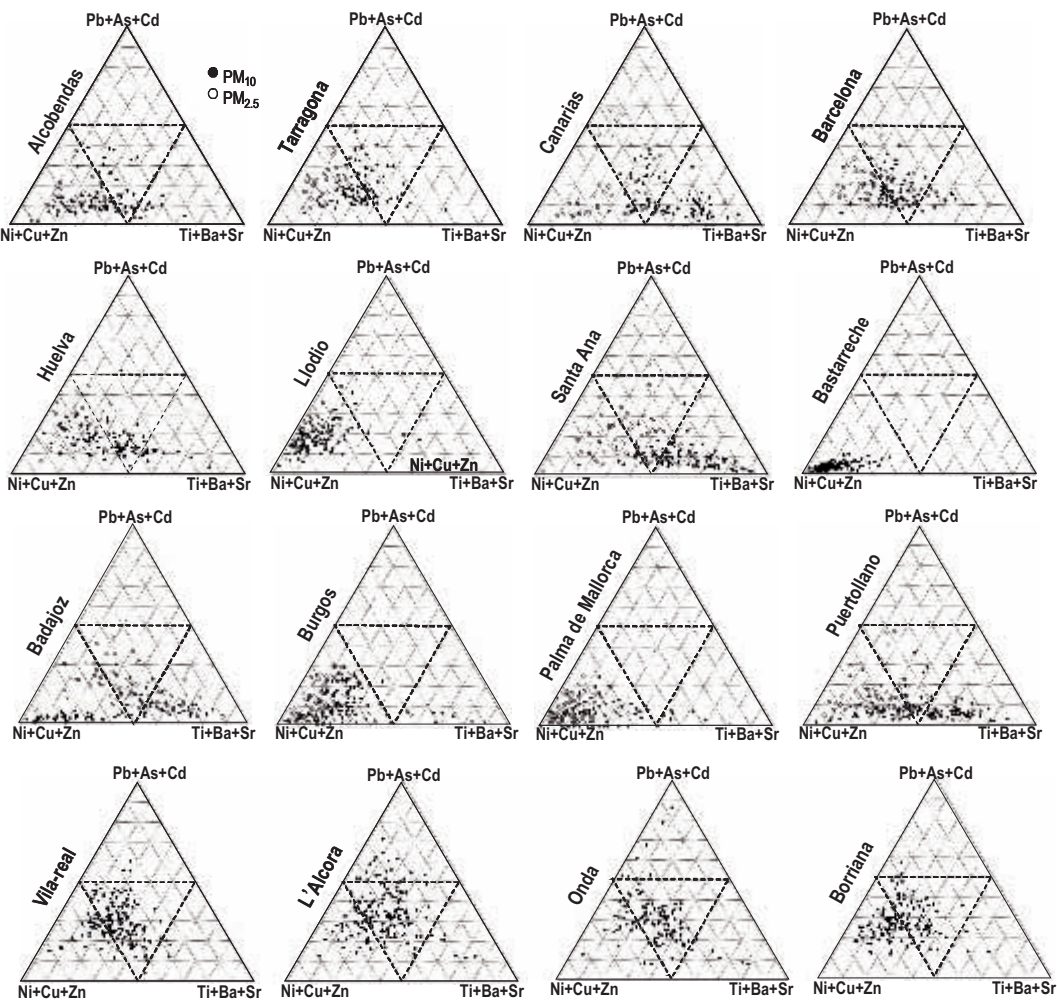
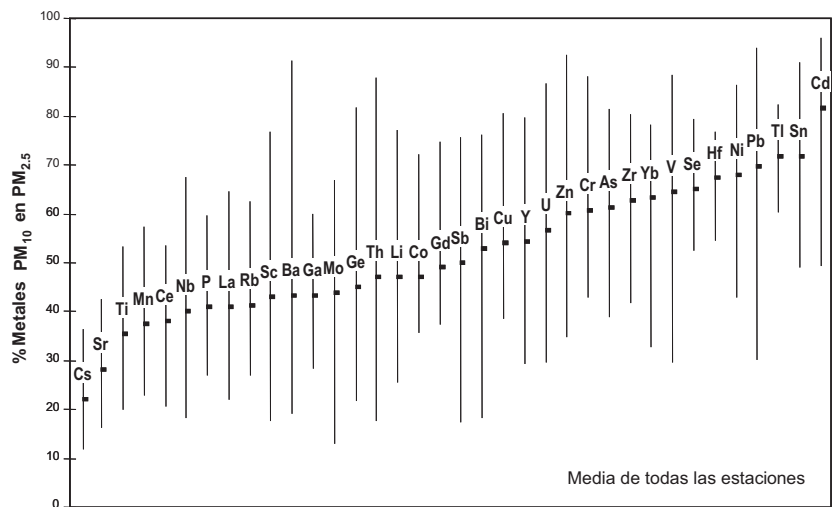


Figura 12. Relación entre los niveles de elementos traza determinados en las fracciones gruesa (PM₁₀) y fina (PM_{2.5}). Valores calculados como el promedio para todas las estaciones.





ANÁLISIS DE CONTRIBUCIÓN DE FUENTES

La identificación de las fuentes de partículas con contribución a los niveles de PM_{10} y $PM_{2.5}$ así como la cuantificación a escala diaria y anual de dichas contribuciones, se ha realizado en base al modelo descrito por Thurston y Spengler (1985) (Figura 13 y Tabla 6). En total, se identifican entre 4 y 6 fuentes en cada una de las estaciones de medida, de las cuales las fuentes crustal, industrial (que presenta perfiles químicos diferentes en función de la estación), marina (sólo en PM_{10}) y tráfico son comunes para todas las estaciones. Los perfiles químicos de las fuentes crustal, tráfico y marina son relativamente constantes en las diferentes estaciones. En cuatro de las estaciones (Bemantes, Barcelona, Canarias y Puertollano) se detecta un factor denominado “combustión”, que se refiere a la combustión de fuel-oil probablemente en centrales térmicas. Por otra parte, en las estaciones de Llodio y Las Palmas se identifica un factor denominado “externo”, que incluye emisiones que no son generadas a escala local sino transportadas en la meso-escala, y que se caracterizan por la presencia de sulfato amónico (reconocido trazador del transporte a larga distancia). Finalmente, en las estaciones de Burgos, Badajoz, Cartagena-Santa Ana, Cartagena-Bastarreche y Puertollano se identifica un factor caracterizado

por compuestos secundarios inorgánicos, aerosoles carbonosos y diferentes elementos traza, cuya naturaleza parece responder a un transporte a escala regional con mezcla de diferentes fuentes, pero cuyo origen último es complejo de determinar.

La contribución en masa de cada una de las fuentes a los niveles de PM_{10} y $PM_{2.5}$ presenta una elevada variabilidad en función de la estación de medida. Los resultados obtenidos en las estaciones de la Península Ibérica son también muy diferentes a los obtenidos en Canarias (Figuras 13a y 13b). La contribución del tráfico a los niveles de PM_{10} en estaciones de fondo urbano peninsulares oscila entre 21 y 34% ($6-15 \mu g/m^3$), pero puede llegar a alcanzar 48% ($23 \mu g/m^3$) en estaciones de tráfico. Esta contribución es menor en la estación de fondo urbano en Canarias 5% ($2 \mu g/m^3$). En las estaciones rurales de la Península la contribución del tráfico a los niveles de PM_{10} varía entre 11-25% ($3-5 \mu g/m^3$).

El factor industrial también presenta importantes variaciones en función del área de estudio. En la Península, esta contribución varía entre el 20 y el 44% ($9-20 \mu g/m^3$) en estaciones de fondo urbano con influencia industrial. En áreas rurales con

Figura 13a. Resultados de los análisis de contribución de fuentes (% contribución a la media anual de masa de PM) realizados para PM_{10} (13a) y $PM_{2.5}$ (13b) en diferentes estaciones de muestreo de España.



Figura 13b. Resultados de los análisis de contribución de fuentes (% contribución a la media anual de masa de PM) realizados para PM₁₀ (13a) y PM_{2,5} (13b) en diferentes estaciones de muestreo de España.



influencia industrial, contribuye en 15-25% de la masa de PM₁₀ (3–6 µg/m³). Se ha de resaltar que la máxima contribución industrial en estaciones rurales se ha registrado en Monagrega. En este caso, este aporte está constituido principalmente por SO₄²⁻ y NO₃, componentes relacionados con los episodios regionales de verano, por lo que este factor comprende tanto los aportes industriales locales como los regionales (26% de la masa de PM₁₀, 6 µg/m³). En las islas Canarias las emisiones industriales sólo contribuyen en un 10% a la masa de PM₁₀, que es un aporte similar al determinado para las emisiones antropogénicas externas (10%).

Las fuentes naturales tienen una mayor influencia en los niveles de PM₁₀ en Canarias que en la Península. El factor marino representa el 35% de la masa de PM₁₀ en las Canarias (12 µg/m³) y sólo el 3-15% en la Península (0,7–3,4 µg/m³). En las regiones interiores (Madrid y Monagrega), esta fracción sólo supone 0,5-1,0 µg/m³, mientras que en las zonas costeras alcanza 2-3 µg/m³. Por último, la carga crustal en PM₁₀ varía del 16 al 36% en todas las áreas, incluyendo las Islas Canarias (33%). Sin embargo en valores absolutos la contribución del factor crustal es máxima en Canarias 11-15 µg/m³. En este caso, una alta proporción de este aporte crustal proviene de África (frecuentemente se registran concentraciones medias diarias de 100-600 µgPM₁₀/m³ durante los episodios Africanos, conocidos localmente como “calimas”). La componente crustal alcanza valores similares en las estaciones de Barcelona y Puertollano (15

µg/m³). Sin embargo, en estos casos, esta alta contribución crustal se debe a la resuspensión por el tráfico (material depositado en la calzada y desgaste del firme de rodadura y frenos) y a otras emisiones industriales más que a los aportes desde el norte de África. La contribución crustal en las estaciones urbanas (Madrid- Escuelas Aguirre, Huelva, Tarragona, Llodio, L’Hospitalet, Badajoz) es también alta (8–12 µg/m³). Si sustraemos la contribución crustal determinada en la estación de fondo rural de Monagrega, 5.5 µg/m³ (atribuible a la resuspensión regional de polvo mineral) de los niveles de material crustal determinados en el fondo urbano, se puede concluir que la contribución crustal local está comprendida en el rango de 2–7 µg/m³ en estaciones urbanas. Esta contribución está relacionada con el fondo mineral de la ciudad originado por actividades antropogénicas (demolición, construcción, tráfico). Si sustraemos los niveles de los componentes minerales determinados en las estaciones de fondo urbano de los medidos en estaciones de tráfico se concluye que las emisiones locales atribuibles a la erosión del pavimento suponen entre 3–5 µg/m³ del aporte crustal a los niveles medios anuales de PM₁₀. Por tanto, una fracción importante de la carga crustal cuantificada mediante el modelo receptor ha de atribuirse a fuentes antropogénicas urbanas como el tráfico. El polvo mineral puede depositarse sobre el firme de rodadura y, en ausencia de lluvia, su resuspensión puede incrementar la carga crustal del PM₁₀. Los modelos receptores no siempre asocian este aporte de polvo con los

trazadores del tráfico como son el nitrato o los aerosoles carbonosos. Para $PM_{2,5}$ la aplicación del análisis factorial ha permitido determinar las mismas fuentes identificadas como responsables de las variaciones de los niveles de PM_{10} . Sin embargo, como se ha comentado previamente, la contribución de los factores crustal y marino ha disminuido considerablemente en $PM_{2,5}$ respecto al PM_{10} . No obstante, en valores relativos, el aporte crustal puede suponer hasta el 20% de la masa de $PM_{2,5}$ especialmente en estaciones de tráfico intenso.

La utilización de un diagrama triangular de 3 componentes “TIC” (Tráfico-Industrial-Crustal) permite ilustrar las diferencias entre la contribución de fuentes de los elementos traza en la masa de PM (Figura 14). Esta figura muestra cómo el método de contribución de fuentes pronostica el predominio de las fuentes industriales en Huelva, Llodio, Bastarache, Burgos, Palma de Mallorca y Puertollano (esta última sin fuente de tráfico determinada), la fuerte influencia del tráfico en Alcobendas y Barcelona, y la importancia de la componente

Tabla 6. Resultados de los análisis de contribución de fuentes (% contribución a la media anual de masa de PM) realizados para PM_{10} y $PM_{2,5}$ en diferentes estaciones de muestreo de España.

PM_{10}	Montseny	Monagrega	Bemantes	Palma	Huelva	Alcobendas	Llodio	Las Palmas	Tarragona
Crustal	23	26	12	16	27	31	26	33	32
Regional	58	26	24	20	<1	22	19	10	<1
Tráfico	<1	13	25	31	33	34	22	5	30
Marino	9	5	14	16	5	6	7	35	9
Industrial	<1	<1	17	15	32	6	15	10	28
No det.	8	30	8	2	3	1	11	7	1

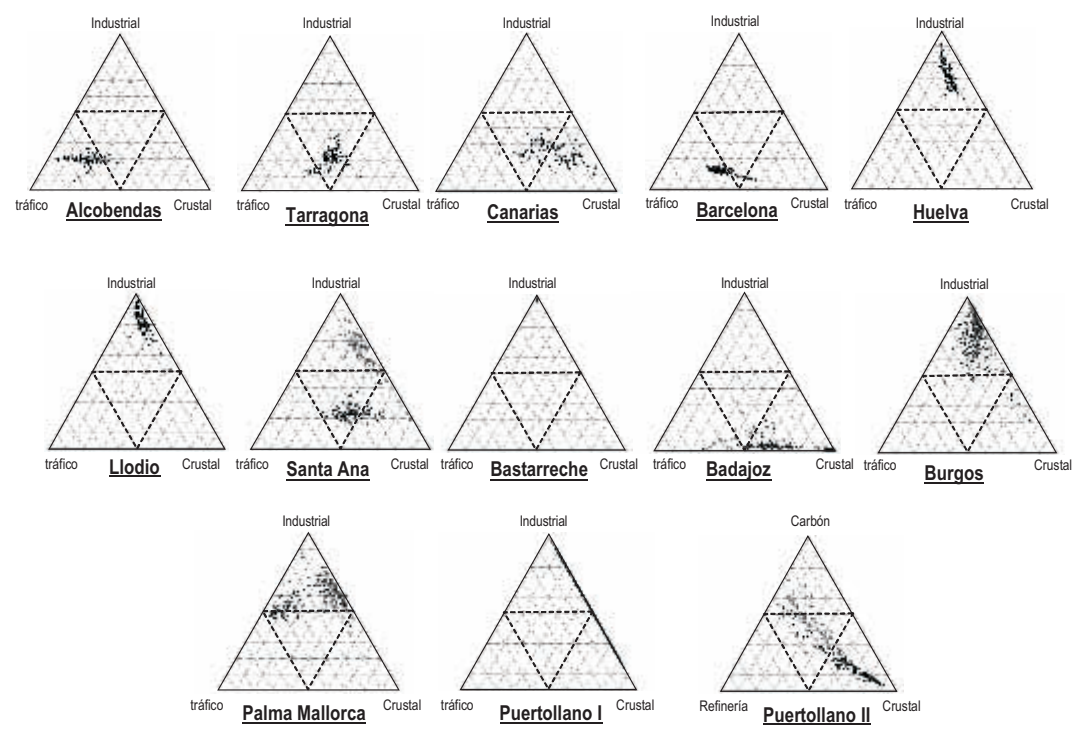
PM_{10}	Madrid	L'Hospitalet	Barcelona	Cart. Bast.	Burgos	Badajoz	Puertollano	Los Barrios	Algeciras
Crustal	26	24	32	25	24	32	36	27	25
Regional	18	<1	<1	17	26	20	<1	<1	<1
Tráfico	48	35	32	19	10	21	<1	26	18
Marino	3	4	5	3	3	4	9	15	17
Industrial	<1	24	30	5	23	9	44	31	37
No det.	5	13	1	31	14	14	11	1	3

$PM_{2,5}$	Badajoz	Palma	L'Hospitalet	Burgos	Cartagena	Puertollano	Badajoz
Crustal	22	19	9	14	9	6	22
Regional	30	30	<1	30	<1	<1	30
Tráfico	28	21	53	9	40	<1	28
Marino	<1	<1	<1	<1	2	<1	<1
Industrial	3	8	35	20	27	59	3
No det.	17	22	3	27	22	35	17

crustal en Canarias y en menor extensión en Badajoz. En Barcelona se observa una estrecha agrupación linear que se extiende desde el componente tráfico al crustal. Por el contrario, los datos de Alcobendas, Tarragona, Santa Ana-Cartagena y especialmente Canarias muestran una amplia dispersión conforme la fuente principal se desplaza entre el tráfico y el crustal. Los resultados relativos a la contribución

de fuentes de $PM_{2,5}$ obtenidos en algunas de las estaciones, son claramente diferentes a los obtenidos para PM_{10} . Así, en la fracción fina los metales traza se agrupan próximos al vértice industrial en todos los casos excepto para Badajoz, donde esta concentración no es tan definida. En el caso de Puertollano, esta agrupación es más clara si se separan las dos fuentes industriales identificadas.

Figura 14. Triángulos de contribución de fuentes Tráfico-Industrial-Crustal (TIC) para elementos traza en PM_{10} (y $PM_{2,5}$ si disponible) para una selección de emplazamientos estudiados.





CONCLUSIONES

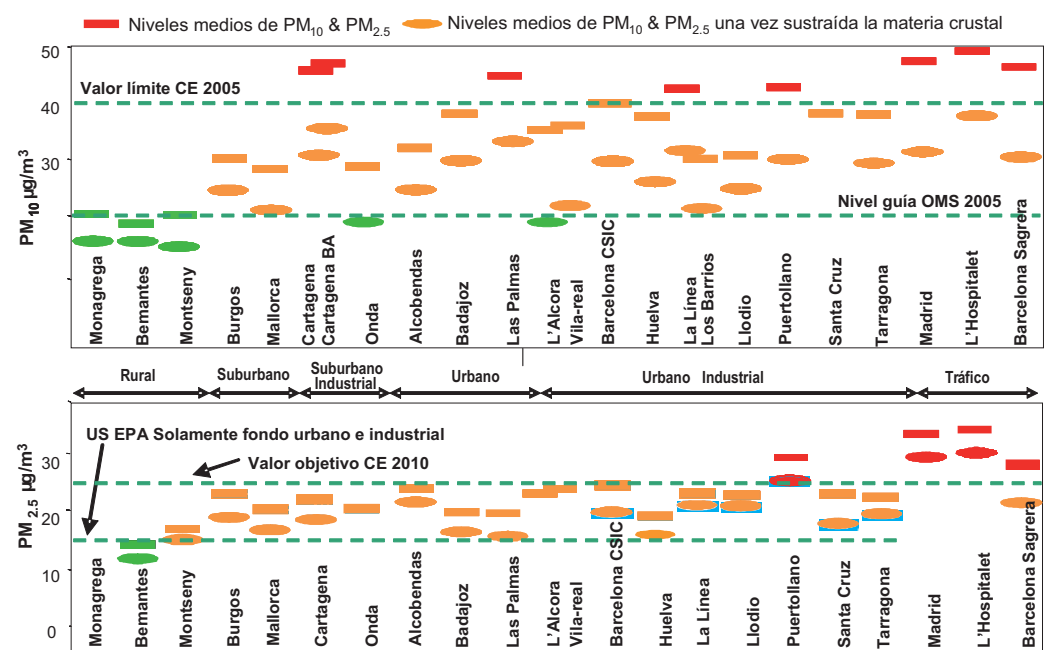
Niveles de PM₁₀ y PM_{2,5}

En la Figura 15 se compendian las concentraciones medias anuales de PM₁₀ registradas durante el periodo de 6 años considerado. En el diagrama también se indica el valor límite anual de PM₁₀ establecido por la Directiva Europea para 2005 (Directiva EU 1999/30/EC). Se puede observar que, con los datos de 1999-2005, este valor límite se excedería en un tercio de las estaciones consideradas, y solamente en las estaciones de fondo rural se cumplirían los valores indicativos sugeridos por la OMS (Organización Mundial de la Salud) (2005). El valor objetivo de PM_{2,5} de 25 µg/m³ (Figura 15) propuesto por la nueva directiva

europaea para enero de 2010 se excedería en un número significativo de estaciones de tráfico e industriales (Figura 15).

Si la carga mineral, principalmente de origen antropogénico pero con niveles más elevados en España que en los países del centro y norte de Europa (Querol *et al*, 2004c) debido a la acumulación en la calzada por causa climáticas como el bajo volumen de precipitación, se sustrae de los valores medios anuales de PM₁₀ y PM_{2,5}, todas las medidas llevados a cabo en los 28 emplazamientos cumplirían los requisitos de las directivas europeas con la excepción de 2 estaciones de tráfico y 1 industrial (Figura 15).

Figura 15. Superior) Media anual PM₁₀ para cada zona de estudio a través del país dependiendo del tipo de estación y comparación con el valor límite 2005 de la CE y con el valor guía OMS 2005. Inferior) Idem para PM_{2,5} comparado con el valor límite CE de 2015 y el de US EPA.



Componentes de PM₁₀ y PM_{2,5}

En la Figura 16 se representan las concentraciones medias anuales de los componentes mayoritarios de PM respecto a los niveles de PM₁₀ y PM_{2,5}. El polvo mineral es el componente de PM que ejerce la mayor influencia en los niveles medios anuales de PM₁₀, siendo el único que siempre incrementa cuando lo hacen los niveles de PM₁₀ (desde entornos rurales a suburbanos, urbanos de fondo, industriales y de tráfico), siendo su contribución

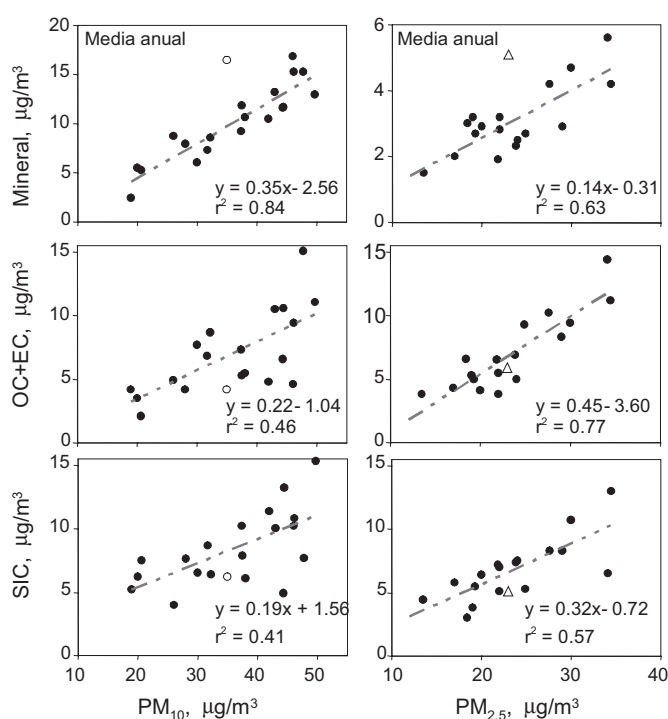
tan importante como (o incluso superior) la de OC+EC y la de la suma de los CIS. A partir de los resultados se deduce que, de manera general a lo largo del país, el incremento de los niveles medios anuales de PM₁₀ en las estaciones urbanas respecto a las rurales se debe principalmente al incremento de la carga mineral y de la concentración de OC+EC en PM₁₀. En las áreas urbanas la alta carga mineral se debe especialmente a dos causas: 1) en primer lugar a las elevadas tasas de resuspensión del polvo depositado en la calzada, originado

bien por el tráfico o por otras fuentes como la construcción y la demolición, cuya acumulación se ve favorecida por el bajo volumen de precipitación que se registra en España (sobre todo si se compara con otros países del centro o norte de Europa); y 2) en menor medida a los aportes de polvo desde África y a la resuspensión natural de suelos áridos. Estudios previos (Rodríguez *et al.*, 2001; Querol *et al.*, 2004a) han demostrado que las invasiones de polvo desde el norte de África pueden tener una elevada influencia en el número de superaciones del valor límite diario. No obstante, el presente estudio indica que estos episodios tienen una menor influencia en los niveles medios anuales de PM, excepto en aquellas regiones de España

próximas al continente africano (sur y este de la Península Ibérica, Canarias y Baleares) donde los valores medios anuales también están influenciados por las contribuciones naturales.

En la fracción $PM_{2,5}$ todos los componentes incrementan su concentración cuando incrementan los niveles de PM. De las estaciones consideradas solamente en dos ocasiones no se sigue esta tendencia general debido a características específicas de éstas (Figura 16). En L'Alcora (círculo en Figura 16) y en Santa Cruz de Tenerife (triángulo en Figura 16) los ratios "carga mineral / PM_{10} " y "carga mineral / $PM_{2,5}$ " son muy superiores a los obtenidos en el resto

Figura 16. Correlación entre los niveles medios anuales de PM_{10} y $PM_{2,5}$ respecto a los niveles de sus componentes mayoritarios en diferentes estaciones de España (O: L'Alcora-industrial área cerámica y Δ : Santa Cruz de Tenerife fondo urbano industrial, ambos no se incluyen en las correlaciones).



de emplazamientos. L'Alcora está localizada en un área influenciada por emisiones minerales industriales relacionadas con la producción cerámica, mientras que en Santa Cruz de Tenerife la concentración de material particulado mineral durante los episodios africanos es muy superior al resto de las regiones españolas debido a su proximidad al norte de África.

En la Figura 17 se resume el rango de los niveles medios anuales de PM_{10} , $PM_{2,5}$, componente crustal, materia orgánica y carbono elemental, sulfato, nitrato, amonio y aerosol marino

determinados en 28 estaciones de control de la calidad del aire de España.

Como ya se ha discutido en publicaciones previas (Querol *et al.*, 2004c), y tal como se muestra en la Figura 18, el valor límite diario de PM_{10} vigente es más restrictivo (exigente) que el valor límite anual. En la Figura 18 se representan los valores medios anuales de PM_{10} y los valores de percentil 90,4 obtenidos en todas las estaciones de control de PM en España en 2004 (a) y se presentan datos comparativos de otros lugares de Europa obtenidos en Airbase 2003 (b). La figura demuestra

de manera inequívoca cómo el valor límite relativo al número de superaciones diarias por año (actualmente 35 ó percentil 90,4), equivalente al valor límite anual de $40 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$, debería estar en el rango 60-65 $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$, en lugar del valor de $50 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ actualmente en vigor. De otra manera, a) para cumplir los requisitos de 35 superaciones del valor límite diario de $50 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$, no se debería exceder un valor límite anual de aproximadamente $30 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$; o b) el número de superaciones del valor límite diario de $50 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ en estaciones en las que se registra un valor medio anual de $40 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ es de unas 80 en lugar de 35. El percentil 90,4 y el valor medio anual no son variables independientes y consecuentemente sólo una de ellas debería ser regulada. Si, a pesar de ello, se mantienen los dos valores límite, se debería considerar un valor límite anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un percentil 90,4 de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El hecho de que se haya observado una misma correlación lineal por toda Europa, con pendientes similares (1,356 para España en 2003, y 1,564 para Europa), indica que esta discusión podría extrapolarse al resto del territorio europeo.

Como una importante conclusión de este estudio, en la Tabla 5 se presentan los rangos de concentración media de un amplio número de elementos traza medidos en entornos rurales y urbanos y en diferentes regiones industriales de España. Estos rangos de concentración pueden ser de gran utilidad para evaluar la calidad del aire en áreas industriales respecto a los niveles de algunos elementos traza de interés ambiental pero sin valores límite u objetivo establecidos, o incluso para identificar posibles emisiones de elementos peligrosos por una determinada actividad industrial. En las zonas rurales menos contaminadas (Monagrega, Bemantes y Montseny), la mayoría de los elementos traza presentan concentraciones medias anuales en el rango 0.1-10 ng/m^3 , y sólo Zr, Mo, Ni, V, Ti, Ba, Cu, Pb, Zn (en orden de menor a mayor concentración) superan 1 ng/m^3 . Las concentraciones incrementan cuando aumenta la contaminación antropogénica, pudiendo ser superiores en un orden de magnitud respecto a las zonas rurales en los casos más extremos para Ti, Cr, Mn, Cu, Zn, As, Sn, W y Pb. Sobre la base de estas comparaciones se puede concluir lo siguiente:

1. Los niveles de Cu y Sb son relativamente más elevados en áreas urbanas que en regiones industrializadas. Esto se debe probablemente a la importancia en las áreas urbanas de las emisiones de material particulado en los procesos de abrasión que el tráfico produce en el firme de rodadura. Metales como Cu, Sb, Fe y Zn son constituyentes principales de los frenos de los vehículos.
2. Los niveles de Cr, Mn, Ni, Zn, Mo, Se, Sn y Pb son relativamente elevados en áreas con producción de acero.
3. Los niveles de V, Cr, Ni y Mo son relativamente elevados en áreas con producción de acero inoxidable. Los niveles de V y Ni en estas zonas (como La Línea y Algeciras) pueden estar también altamente influenciados por la presencia de industrias petroquímicas y de combustión de fuel-oil (centrales térmicas y emisiones de barcos).
4. Los niveles de As, Bi y Cu son relativamente más elevados en áreas con industria metalúrgica de cobre.
5. Los niveles de Zn son relativamente elevados en zonas bajo la influencia de la metalurgia del zinc.
6. Los niveles de V y Ni son relativamente elevados únicamente en una de las áreas con plantas petroquímicas (Algeciras-La Línea), pero no en las otras (Cartagena, Huelva, Puertollano y Tarragona) donde los niveles registrados para estos dos elementos aparecen dentro del rango usual en zonas urbanas. Tal como se mencionó previamente los niveles elevados de V y Ni en Algeciras y La Línea pueden también atribuirse a la combustión de fueloil: centrales térmicas y a las importantes emisiones de barcos en la zona del estrecho de Gibraltar.
7. El área de producción cerámica se caracteriza por un número de elementos traza presentes en niveles relativamente elevados si se comparan con el rango usual en zonas urbanas y en zonas con otras actividades industriales. Dichos elementos incluyen Zn, As, Se, Zr, Cs, Tl y Pb, y su elevada concentración está relacionada probablemente con la producción y uso de componentes de esmaltes cerámicos.

El valor límite anual para el Pb fijado por la Directiva 1999/30/CE para el año 2005 ($500 \text{ ng}/\text{m}^3$) no se excedió en ninguna de las estaciones de muestreo, así las concentraciones de Pb en zonas urbanas fueron generalmente inferiores a 30 ng/m^3 . En el caso de As, Cd y Ni, algunos de los niveles fijados para enero de 2013 de acuerdo a la Directiva 2004/107/CE ($6 \text{ ngAs}/\text{m}^3$, $5 \text{ ngCd}/\text{m}^3$ y $20 \text{ ngNi}/\text{m}^3$) fueron superados únicamente en determinados emplazamientos para el caso del Ni (alrededor de focos de emisión de acerías). Los niveles de As registrados son cercanos al objetivo en algunas ocasiones pero no se registran superaciones en las estaciones estudiadas desde 2005. Sí se registraron superaciones en periodos de estudio anteriores tanto en el sector cerámico como en la metalurgia del cobre. A partir de estos resultados podemos esperar que probablemente España no tenga grandes problemas en el futuro

para cumplir los valores límite de la directiva de la Unión Europea para la calidad del aire en lo que respecta a los niveles de metales.

Contribución de fuentes de

PM₁₀ y PM_{2,5}

El análisis de contribución de fuentes para el material particulado se presenta como ejemplo de los resultados obtenidos a partir del estudio presentado. Sus puntos más importantes se resumen a continuación:

1. La contribución directa del tráfico alcanza valores de entre 30-48% del valor anual de PM₁₀ en zonas urbanas, sin incluir los aerosoles secundarios que se forman a partir de precursores gaseosos del tráfico. Estos valores pueden ser inferiores (21%) en algunas zonas urbanas como Badajoz donde las partículas de origen crustal y secundario son predominantes.
2. La contribución industrial alcanza, en la mayoría de las zonas industriales, cargas próximas al 30% del nivel anual de PM₁₀. Pueden registrarse valores excepcionalmente elevados en zonas de gran influencia industrial (44% en Puertollano).
3. Hay una importante y siempre presente fuente de origen crustal que en realidad no es una fuente única, sino que incluye una mezcla de material mineral tanto natural como antropogénico (polvo de la carretera y de trabajos de demolición y construcción entre otros) depositado en áreas urbanas y que es constantemente resuspendido por el tráfico y el viento. Esta carga representa del 25 al 35% de la masa de PM₁₀ en las zonas urbanas, pero puede llegar a alcanzar hasta el 50% en zonas industriales con emisiones de partículas primarias. Es importante destacar el incremento de Norte a Sur que se aprecia al observar el contenido en material mineral en los niveles de PM₁₀ al mismo tiempo que la aridez (causada por los bajos niveles de precipitación) y la proximidad al continente africano se incrementan.
4. La contribución marina está limitada al 3-5% del nivel medio anual de PM₁₀ en áreas continentales ó 4-10% en zonas costeras, pero puede alcanzar hasta el 30-35% en zonas

urbanas de las Islas Canarias. Este elevado porcentaje se debe a las relativamente bajas concentraciones de PM₁₀ y a las elevadas velocidades de los vientos provenientes del Atlántico.

5. Hay una contribución importante de masa indeterminada por el modelo en las zonas de fondo regional. Este hecho se atribuye a la relativamente elevada proporción de agua en PM₁₀ que no puede extraerse de la muestra en las condiciones de 25 ó 50% humedad en las cámaras después de 48 h de estabilización. Este artefacto es inherente a la estrategia del método de muestreo y es más importante en áreas remotas debido a los bajos niveles de material particulado en comparación a los niveles de agua en el aire de estas zonas respecto a los de zonas más contaminadas.
6. Otra limitación que encontramos a la metodología de modelización basada en el receptor para determinar la contribución de fuentes es la identificación frecuente de una contribución regional de compuestos inorgánicos secundarios (CIS) produciendo niveles inferiores de los otros componentes por comparación. Este factor puede suponer hasta un 30% de los niveles totales de PM₁₀ y es de hecho una fuente regional o externa resultado de una mezcla de contribuciones, y no de una única fuente. La carga relativa de dicha mezcla de fuentes es inferior en zonas contaminadas debido a que parte de esta contribución es asignada por el modelo a fuentes de emisión locales que están parcialmente asociadas con CIS y determinados trazadores químicos.
7. Hay un incremento gradual desde niveles inferiores en la costa Atlántica a niveles relativamente más elevados en la costa Mediterránea de España en lo que se refiere a la carga de CIS. Esto se atribuye a la menor dispersión de los contaminantes, menos tasa de precipitación y probablemente niveles más elevados de NH₃ (asociados con las emisiones agrícolas) en la parte este del país. Así el origen de los niveles elevados de CIS se debe a los relativamente elevadas emisiones de NO_x y SO₂ por parte de fuentes industriales y urbanas, pero también a las emisiones elevadas de NH₃ a partir de actividades agrícolas en el este peninsular.

Figura 17. Rango de los niveles medios anuales de PM_{10} , $PM_{2.5}$, y componentes crustal, materia orgánica y carbono elemental (OM+EC), compuestos inorgánicos secundarios ($CIS=SO_4^{2-}+NO_3^-+NH_4^+$) y aerosol marino medidos en 28 estaciones de vigilancia y control de la calidad del aire de España. * Cartagena-Santa Ana excluida debido a la influencia de trabajos de construcción alrededor de la estación durante el periodo de estudio.

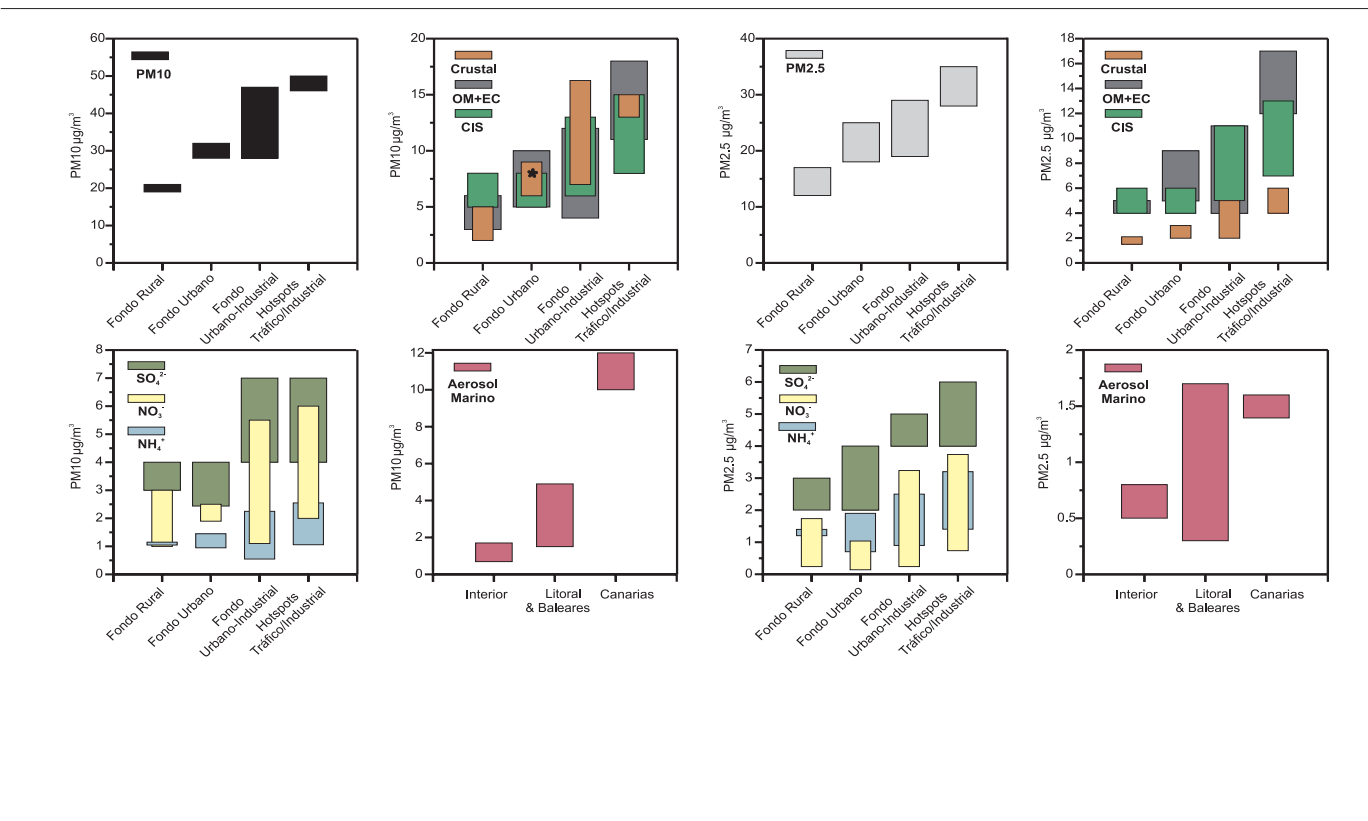
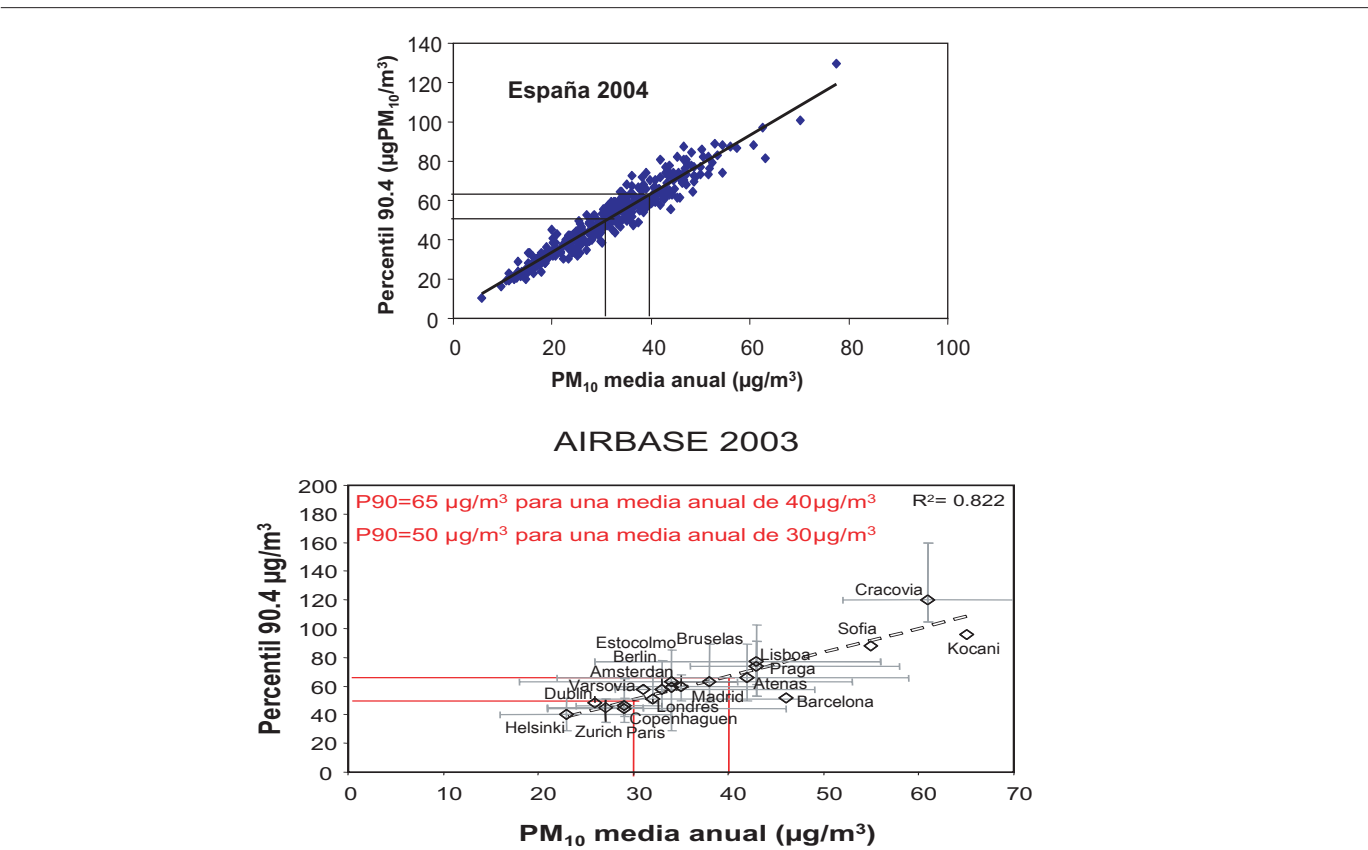


Figura 18. Niveles medios anuales de PM_{10} frente al percentil 90.4 para a) todas las estaciones de muestreo en España en el 2004, y b) otras estaciones europeas (datos de Airbase, http://air-climate.eionet.eu.int/databases/airbase/index_html).



AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado mediante convenios de colaboración de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente y del Plan Nacional de I+D del Ministerio de Educación y Ciencia (CGL2004-05984_C07-02/CLI, REN2001-0659-C03-03), y contratos de investigación respaldados por Comunidades Autónomas de Andalucía, Cataluña, Madrid, y Valencia. Los autores agradecen a NOAA Air Resources Laboratory (ARL), HYSPLIT, la página web READY (<http://www.arl.noaa.gov/ready.html>) el permiso para su utilización en este trabajo, y a NASA/Goddard Space Flight Center (Maryly,

USA), Atmospheric Modelling and Weather Forecasting Group (University of Athens), Euro-Mediterranean Centre on Insular Coastal Dynamics (Malta), Marine Meteorology Division, Naval Research Laboratory (Monterrey, USA) y el proyecto SeaWIFS (NASA) por la información obtenida a partir de sus mapas TOMS, SKIRON, DREAM y NAAPS e imágenes satélite respectivamente. Los autores también agradecen a los Departamentos de Medio Ambiente de los Gobiernos Autónomos de Catalunya, Galicia, Madrid, Andalucía, Extremadura, Baleares, Valencia, Canarias, Euskadi, Castilla-La Mancha y Castilla y León su apoyo y colaboración.





BIBLIOGRAFÍA

Abbey D., Nishino N., McDonnell W., Burchette R., Knutsen S., Beeson W., Yang J., 1999. Long-term inhalable particles and other air pollutants related to mortality in non-smokers. *American Journal of Respiratory Critical Care Medicine* 159, 373-382.

Adams P.J., Seinfeld J.H., Koch D.M., 1999. Global concentrations of tropospheric sulphate, nitrate, and ammonium aerosol simulated in a general circulation model. *Journal of Geophysical Research* 104, 13791-13823.

CE 2004. Comisión Europea. Second Position Paper on Particulate Matter – CAFE Working Group on Particulate Matter, April 2004, 234 pp.

Dockery D., Pope C., Xu X., Spengler J., Ware J., Fay M., Ferris B., Speizer F., 1993. An association between air pollution y mortality in six US cities. *New Engly Journal of Medicine* 329, 1753-1759.

Draxler R.R., Rolph G.D., 2003. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.

EPER-European Pollutant Emissions Register. Final Report., 2001. 181 pp (<http://www.eper.cec.eu.inte>).

Escudero M., Castillo S., Querol X., Avila A., Alarcón M., Viana M.M., Alastuey A., Cuevas E., Rodríguez S., 2005. Wet and dry African dust episodes over Eastern Spain. *Journal of Geophysical Research* 110, 4731-4746.

Henry R.C., Lewis C.W., Hopke P.K. and Williamson H.J., 1984. Review of receptor models fundamentals. *Atmospheric Environment* 18(8), 1507-1515.

Hoek G., Brunekreef B., Goldbohm S., Fischer P., Van den Brant P., 2002. Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. *The Lancet*. <http://image.thelancet.com/extras/01art7366web.pdf>.

McGovern F.M., Nunes F., Raes F., Gonzales-Jorge H., 2002 Marine and anthropogenic aerosols at Punta Del Hidalgo, Tenerife, and the aerosol nitrate number paradox. *Anthropogenic*

influences on the chemical and physical properties of aerosols in the Atlantic sub-tropical region during July 1994 and July 1995. Journal of Geophysical Research 104, 14309-14319.

Millán M., Salvador R., Mantilla E., Kallos G., 1997. Photo-oxidant dynamics in the Mediterranean basin in summer: results from European research projects. *Journal of Geophysical Research* 102, 8811-8823.

Moreno T., Querol X., Alastuey A., Viana M., Gibbons W., 2005. Exotic dust incursions into central Spain: implications for legislative controls on atmospheric particulates. *Atmospheric Environment* 39, 6109-6120.

OMS, 2005. OMS Air quality guidelines global update, Bonn, Germany, October 2005, 30 pp. <http://www.euro.who.int/Document/E87950.pdf>

Pakkanen A., Hillamo R.E., Aurela M., Yersen H.V., Grundahl L., Ferm M., Persson K., Karlsson V., Reissell A., Royset O., Floisy I., Oyola P., Ganko T., 1999. Nordic intercomparison for measurement of major atmospheric nitrogen species. *Journal of Aerosol Science* 30, 247-263.

Plaza J., Gómez-Moreno F.J., Núñez, Pujadas M., Artíñano B., 2006. Estimation of secondary organic aerosol formation from semicontinuous OC-EC measurements in a Madrid suburban area. *Atmospheric Environment* 40,1134-1147.

Pope C., Burnet R., Thun M., *et al.*, 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA* 287, 1132-1141.

Putaud J.P., Raes F., Van Dingenen R., Baltensperger U., Brüggemann E., Facchini M.C., Decesari S., Fuzzi S., Gehrig R., Hüglin C., Laj P., Lorbeer G., Maenhaut W., Mihalopoulos N., Müller K., Querol X., Rodríguez S., Schneider J., Spindler G., ten Brink H., Tørseth K., Wiedensohler A., 2004. A European aerosol phenomenology – 2 chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe. *Atmospheric Environment* 38, 2579-2595.

Querol X., Alastuey A., Lopez-Soler A., Plana F., Puigercus J.A, Ruiz C.R., Mantilla E., Juan R., 1998. Seasonal evolution of atmospheric suspended particles around a coal-fired power

station: Chemical Characterization. *Atmospheric Environment*, 32, 4, 719-731.

Querol X., Alastuey A., Viana M.M., Rodríguez S., Artiñano B., Salvador P., Garcia Do Santos S., Fernández Patier R., Ruiz C., de la Rosa J., Sánchez de la Campa A., Menéndez M., Gil J.I., 2004a. Speciation and origin of PM₁₀ and PM_{2.5} in Spain. *Journal of Aerosol Sciences*, 35, 1151-1172.

Querol X., Alastuey A., Rodríguez S., Viana M.M., Artiñano B., Salvador P., Mantilla E., Garcia Do Santos S., Fernyez Patier R., De La Rosa J., Sanchez De La Campa A., Menendez M., 2004b. Levels of PM in rural, urban and industrial sites in Spain. *The Science of Total Environment*. 334-335, 359-376.

Querol X., Alastuey A., Ruiz C.R., Artiñano B., Hansson H.C., Harrison R.M., Buringh E., Ten Brink H.M., Lutz M., Bruckmann P., Straehl P., Schneider J., 2004c. Speciation and origin of PM₁₀ and PM_{2.5} in selected European cities. *Atmospheric Environment* 38, 6547-6555.

Rodríguez S., Querol X., Alastuey A., Kallos G., Kakaliagou O., 2001. Saharan dust contributions to PM₁₀ and TSP levels in Southern and Eastern Spain. *Atmospheric Environment* 35, 2433-2447.

Rodríguez S., Querol X., Alastuey A., Viana M.M., Alarcón M., Mantilla E., Ruiz C. R., 2004. Comparative PM₁₀-PM_{2.5} source contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in Eastern Spain. *Science of the Total Environment* 328, 95-113.

Schaap M., Müller K., ten Brink H.M., 2002. Constructing the European aerosol nitrate concentration field from air quality analysed data. *Atmospheric Environment* 36, 1323-1335.

Thurston G.D. y Spengler J.D., 1985. A quantitative assessment of source contribution to inhalable particulate matter pollution in Metropolitan Boston. *Atmospheric Environment* 19 (1), 9-25.

Viana M., Querol X., Alastuey A., Cuevas E., Rodríguez S., 2002. Influence of African dust on the levels of atmospheric particulates in the Canary Islands air quality network. *Atmospheric Environment* 36, 5751-5875.

Visser H., Buringh E., van Breugel P.B., 2001. Composition and origin of airborne particulate matter in the Netherlys. National Institute for Public Health and the Environment, RIVM. The Netherlys. Report 650010029. 104 p.

Zabalza J., Ogulei D., Hopke P.K., Lee J.H., Hwang I., Querol X., Alastuey A., Santamaría J.M., 2006. Concentration and sources of PM₁₀ and its constituents in Alsasua, Spain. *Water, Air, and Soil Pollution*, 174: 385-404.